

地域社会 DX 推進パッケージ事業(自動運転レベル4検証タイプ)

宮城県仙台市

通信の安定性確保と都市 OS 連携による環境情報を用いた
自動運転走行の実証

実績報告書

2026年2月13日

NTTドコモビジネス株式会社

仙台市における自動運転の社会実証機関

目次

0.	エグゼクティブサマリ.....	1
0.1	実証概要.....	1
0.2	KPI/KGIの内容と達成状況.....	1
0.3	考察.....	2
0.4	成果.....	3
0.5	課題.....	4
1.	実証の背景・目的.....	5
1.1	実証の背景.....	5
1.2	レベル4自動運転を社会実装するうえでの実証地域における課題.....	5
1.3	実証の目的.....	6
1.4	最終目標・構想イメージ.....	7
1.5	「最終目標・構想イメージ」における本実証の位置づけ・目標.....	8
2.	業務実施体制.....	11
2.1	実証機関.....	11
2.2	実施体制図.....	13
3.	自動運転の運行結果.....	14
3.1	運行場所.....	14
3.2	運行期間.....	15
3.3	運行時間帯・頻度・運行方式.....	16
3.4	運行者.....	16
3.5	運行体制.....	16
3.6	自動運転車両の特徴.....	18
3.7	自動運転に関する手続き.....	19
3.8	自動運転の走行結果.....	21
4.	実証の手法.....	24
4.1	①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保.....	24
4.1.1	中山間地におけるキャリアネットワークの不感エリア対策として、自営ネット	

	ワークを協調型インフラ基盤×Cradioにより組み合わせた通信接続性検証 (秋保)	24
	1) 目的	24
	2) 実証内容の詳細	24
	3) 利用技術	25
	4) 必要性・緊急性・新規性	26
	5) 検証条件	26
	6) 開発・評価項目	26
	7) KPI/KGI	28
4.2	②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保	29
4.2.1	協調型インフラ基盤× Cradioによる複数キャリアネットワークの通信リ ソース統合の最適化検証	29
	1) 目的	29
	2) 実証内容の詳細	29
	3) 利用技術	30
	4) 必要性・緊急性・新規性	31
	5) 検証条件	32
	6) 開発・評価項目	32
	7) KPI/KGI	34
4.2.2	スライシングによる通信リソース効率化の検証	34
	1) 目的	34
	2) 実証内容の詳細	35
	3) 利用技術	35
	4) 必要性・緊急性・新規性	36
	5) 検証条件	36
	6) 開発・評価項目	36
	7) KPI/KGI	39
4.3	③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用 する技術の頑健性検証	41
4.4	④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危 険回避行動の連携・実装	42
4.4.1	路面の凍結/積雪状況に応じた車両制御の実装、路面凍結センサデータの遠 隔監視装置へのリアルタイム転送および路面状態の表示と走行モードへのア シスト	42
	1) 目的	42
	2) 実証内容の詳細	42
	3) 利用技術	43
	4) 必要性・緊急性・新規性	43
	5) 検証条件	44
	6) 開発・評価項目	45
	7) KPI/KGI	46
4.4.2	災害情報、道路工事状況に応じた車両制御の実装	49

1)	目的	49
2)	実証内容の詳細	49
3)	利用技術	50
4)	必要性・緊急性・新規性	50
5)	検証条件	51
6)	開発・評価項目	52
7)	KPI/KGI	53
4.5	⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証	58
4.6	レベル4の社会実装に向けた検討	59
4.6.1	運用検証	59
1)	システムの操作性やユーザインターフェースに関する評価(特に遠隔監視員の軽減負担等)	59
2)	通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度	60
3)	データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策	60
4)	通信システム(路車協調システムや端末を含む)の維持管理・保守	60
4.6.2	効果検証	61
1)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化	61
2)	自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度	61
3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果	62
4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策	62
5.	通信システムに関する構築	64
5.1	通信システムの全体像	64
5.2	システム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項等	64
6.	実証結果・考察	66
6.1	①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保	66
6.1.1	協調型インフラ基盤×Cradioによる複数キャリアネットワークの通信リソース統合の最適化検証	66
1)	実証スケジュール	66
2)	開発・評価項目の結果	66
3)	KPI/KGI との比較結果	80
4)	成果・課題	81
6.2	②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保	83
6.2.1	協調型インフラ基盤×Cradioによる複数キャリアネットワークの通信リ	

	ソース統合の最適化検証	83
1)	実証スケジュール	83
2)	開発・評価項目の結果	84
3)	KPI/KGI との比較結果	111
4)	成果・課題	112
6.2.2	スライシングによる通信リソース効率化の検証	112
1)	実証スケジュール	112
2)	開発・評価項目の結果	113
3)	KPI/KGI との比較結果	119
4)	成果・課題	121
6.3	③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用 する技術の頑健性検証	124
6.4	④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危 険回避行動の連携・実装	125
6.4.1	路面の凍結/積雪状況に応じた車両制御の実装、路面凍結センサデータの遠 隔監視装置へのリアルタイム転送および路面状態の表示と走行モードへのア シスト	125
1)	実証スケジュール	125
2)	開発・評価項目の結果	125
3)	KPI/KGI との比較結果	127
4)	成果・課題	131
6.4.2	災害情報と道路工事状況に応じた車両制御の実装	132
1)	実証スケジュール	132
2)	開発・評価項目の結果	132
3)	KPI/KGI との比較結果	138
4)	成果・課題	141
6.5	⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証	142
6.6	レベル4の社会実装に向けた検討の結果	143
6.6.1	運用検証	143
1)	システムの操作性やユーザインターフェースに関する評価(特に遠隔監視 員の軽減負担等)	143
2)	通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直 し等、地域交通の持続性への寄与度	144
3)	データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策	145
4)	通信システム(路車協調システムや端末を含む。)の維持管理・保守	146
6.6.2	効果検証	147
1)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変 化	147
2)	自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度 148	
3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利 便性の向上効果	149

4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策	150
6.7	レベル4社会実装に向けた考察	153
7.	本実証の総括	155
7.1	本実証の成果・課題	155
7.2	社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性	156
8.	参考(アンケートの設問一覧)	160
8.1	東部北ルートにおけるアンケート設問	160
8.1.1	遠隔監視員を対象としたアンケート	160
8.1.2	一般試乗者を対象としたアンケート	162
8.2	秋保ルートにおけるアンケート設問	163
8.2.1	遠隔監視員を対象としたアンケート	163
8.2.2	一般試乗者を対象としたアンケート	165

0. エグゼクティブサマリ

0.1 実証概要

本実証は、全国的に深刻化するバス運転士不足や運行コスト増大といった社会課題を背景に、仙台市における地域公共交通の持続性確保を目的として実施したものである。特に、冬季の積雪・路面凍結や災害リスク、不感・弱電界エリアが混在する中山間地・臨海部を抱える同市においては、レベル4自動運転の社会実装に向け、通信の安定性確保と周辺環境情報を活用した安全な車両制御が大きな課題となっている。

本実証では、秋保ルートおよび東部北ルートを対象に、自動運転車両の遠隔監視および制御に必要な常時通信接続性の確保と、都市 OS 等と連携した外部データ活用による自動運転走行の高度化を目的として検証を行った。具体的には、複数キャリア回線とローカル 5G を協調型インフラ基盤×Cradioにより統合・アグリゲーションすることで、条件不利地域における通信断の解消や輻輳環境下での通信品質維持を検証した。また、ネットワークのスライシングによる通信の優先帯域確保により、遠隔監視映像や車両制御通信の通信安定性向上を検証した。あわせて、路面凍結・積雪、災害情報、道路工事情報の周辺環境情報を都市 OS (FIWARE) から取得し、自動運転車両の走行モード切り替えや危険回避行動に反映するユースケースを検証した。なお、災害・道路工事情報についてはダミーデータを用いて実施した。

これらの検証により、通信基盤とデータ連携を組み合わせた安全かつ効率的な自動運転運行の実現可能性を明らかにし、将来的なレベル4自動運転の社会実装およびスマートシティ構築に資する知見の獲得を目指した。

0.2 KPI/KGI の内容と達成状況

本実証では、レベル4相当の自動運転の社会実装に必要な通信・データ連携を検証するため、ユースケースごとに KPI・KGI を設定した。

ユースケース①[遠隔監視：自動運転システムの常時通信接続確保：条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保]では、エリアカバー率 92%以上および常時映像監視の可否を KPI とした。これは、中山間地の無線環境における良好な自動運転車両の走行を実現するにあたり妥当な指標であると判断した。実証の結果、全項目において KPI は達成した。

ユースケース②(遠隔監視：自動運転システムの常時通信接続確保：通信の安定性確保)では、東部北ルートでは、スライシングの活用によるデータの受信率が 99%以上であることおよび、白杖検知成功率が 90%以上であることを KPI とした。これは、自動運転バスの安全な利用および、イベント期間中のような高い輻輳環境においても自動運転車両制御に必要なデータが受信できることを確認するにあた

り妥当な設定であると判断した。また、秋保ルートについては、高精細な常時映像監視、車両制御の可否および、公衆網およびローカル 5G カバレッジ内でのアップリンクスループットが平均 6Mbps 以上得られることを KPI として設定した。これは、安全性の観点から遠隔監視員による適切な判断が求められるため、妥当な設定であると判断した。実証の結果、公衆網およびローカル 5G カバレッジにおけるアップリンクスループットに関する項目を除き、KPI は達成した。未達の内容に関しては、協調型インフラ基盤および Cradio を利用した 3 回線統合時による受信スループットの平均値が 6Mbps の目標に対して 5.2Mbps に留まった。しかし、未達の部分に関しては、送信ビットレートの設定を全体的に高める運用調整を行うことで、平均 6Mbps 程度のスループットを安定的に達成できる可能性があると考えられる。

ユースケース④(安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装)では、東部北ルートについては、災害・工事情報通知に基づく車両の停止、ルート変更通知が自動運転車両で 99%受信できること、およびダッシュボードに災害・工事情報を追加し、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを確認すること等を KPI として設定した。また、秋保ルートについては、路面状態判定精度が 95%以上および、凍結センシングのサンプリングが 1.0 秒以内であること等を KPI として設定した。これらは、効率的かつ安全な自動運転車両制御を実行するため妥当な設定であると判断した。実証の結果、全項目において KPI は達成した。

0.3 考察

本実証の各ユースケースにおける検証項目および運用検証・効果検証の結果を踏まえ、レベル4相当の自動運転の社会実装に向けた考察を行った。

ユースケース①では、複数キャリアネットワークとローカル5Gを活用して、単一キャリアでは実現困難であった中山間地における通信カバレッジの拡張により、常時遠隔監視や車両制御が可能となったことが確認された。特に、秋保大滝周辺のような観光地においては、ローカル5Gによる局地的なカバレッジエリアの構築により通信不感エリアを解消できる点は、中山間地における自動運転の実現性を高める重要な知見であるが、一方で本実証ルート全長の範囲では不感エリアが残っている。

ユースケース②では、秋保ルートについては、協調型インフラ基盤×Cradioによる通信品質予測に基づく動的トラフィック制御により、複数回線を効率的に活用し、瞬間的な品質劣化にも対応しながら、高精細な常時遠隔監視、車両制御が可能となったことが確認された。送受信ビットレートの分析から、複数回線統合により平均6Mbps以上のスループットを確保できた一方で映像伝送アプリケーションの輻輳制御メカニズムやTCP(Transmission Control Protocol)の特性により送信ビットレートに変動が生じた点は課題として明らかとなった。

また、東部北ルートでは、ネットワークスライシング技術の活用により、高輻輳環境下においても車両制御に必要な通信品質を優先的に確保できることが確認された。スループット測定の結果、スライシング適用端末は測定期間中の大半において30Mbpsで安定した通信を実現した一方、5G ワイド適用端末やノーマル端末では一部区間でスループット低下が確認され、また、白杖検知については、実運用に近

い環境下においても 90%以上の高精度な白杖検知を実現できた。本結果から、自動運転バス車内入口のカメラによる白杖検知により、白杖所持者の乗降時及び乗車中の安全確保への寄与や、監視員の業務負荷を低減しつつ、安全かつ効率的な業務遂行に寄与できると考えられる。

ユースケース④では、都市 OS を介して取得した路面凍結情報、災害情報、工事情報を車両制御に反映することで、車両搭載センサのみでは把握困難な外部環境情報を活用した柔軟な運行判断が可能となることが確認された。秋保ルートでは、センサによる路面状態のセンシングと都市 OS を介した遠隔監視装置への情報連携により、積雪地における安全な自動運転走行の実現性が示された。東部北ルートでは、都市 OS を介して取得した災害情報、工事情報に基づく車両制御が妥当であるとの評価が得られた一方で、情報表示や利用者への案内内容について改善の余地があることが示された。

0.4 成果

実証全体を通じて、レベル4相当の自動運転の社会実装に資する通信基盤技術および都市 OS 連携による周辺環境情報活用の有効性が示された。

通信基盤技術については、中山間地におけるエリアカバー率および多数ユーザによる高輻輳環境において、自動運転車両の常時映像監視および車両制御が可能となる通信環境の構築が実現できた。走行中の映像データは遠隔監視室で継続的に取得・表示され、管理者による運行状況の把握や判断に支障は確認されなかった。さらに、協調型インフラ基盤×Cradioにより、複数の公衆網およびローカル5G網を回線品質に応じて適応的に統合し、仮想的に一つの回線として利用できることを確認した。これにより、通信環境が一様でない実証ルートにおいても、遠隔監視室からの常時映像監視および運行状況の把握を前提とした自動運転車両の運行管理が成立することが示された。

さらに、安定した通信を活用した白杖検知の実証では、カメラ配置と AI 解析の最適化により、実運用に近い環境下でも高精度な白杖検知を実現した。また、遠隔処理環境においてもエッジ側と比較して同水準の検知性能であることが示され、監視員の業務負荷を低減しつつも、安全かつ効率的な業務遂行を支援する仕組みであることが示された。

都市 OS 連携については、路面凍結センサによるセンシングデータ、災害情報、工事情報と言った外部データを、都市 OS を介して車両制御に反映する仕組みを構築し、車両搭載センサのみでは把握困難な環境情報を活用した運行判断が可能となることが確認された。東部北ルートのアンケート結果から、遠隔監視装置への情報反映により、遠隔監視員が迅速に運行可否を判断し、その判断に基づく減速・停止・ルート変更等の制御が適切に行われることが確認された。さらに一般試乗者からも安全性が評価され、都市 OS を連携した外部情報活用が自動運転バスの安全性・信頼性向上に寄与することが示された。

これらの成果より、複数回線併用による瞬間的な品質劣化への対応、地域特性を踏まえた外部データ活用による安全性向上、障がい者支援を含む多様なユースケースへの展開可能性という、今後社会実装に資する要素技術およびユースケースの有効性が確認された。

0.5 課題

実証全体を通じて、レベル4相当の自動運転の社会実装に向けた以下の課題が明らかとなった。

通信基盤技術に関して、常時映像監視および車両制御が可能であることを確認した一方で、一部区間においては目標として設定したアップリンクスループットが未達となった。通信遅延が運行判断や監視業務に与える影響は限定的であったため、今後は送信ビットレートの設定全体的に高める運用調整により達成できる可能性があると考えられる。今後の検討すべき事項として、気象条件や時間帯により変動する路面凍結・積雪状況を踏まえた、より多様な環境下でのデータ蓄積と検証、走行モード切り替えや減速挙動のさらなる最適化、通信品質の変動を前提とした映像表示や情報提示方法の改善、スループット目標の安定的達成に向けた運用面での最適化が、今後検討すべき事項として挙げられた。

白杖検知では、強い日差しや反射による光環境の変化、および映像伝送に伴う品質劣化により、検知精度が一時的に不安定となり、アラート発報の遅れに繋がる可能性が確認された。加えて、遠隔監視の際には映像圧縮やフレーム欠損等の影響によりエッジ型処理と比較して検知精度がわずかに低下する傾向が確認された。今後は映像伝送品質の安定化やネットワークの状況変動を吸収できる仕組みの導入の検討が必要である。

都市 OS 連携については、外部情報の活用により柔軟な運行判断が可能となった一方で、アンケート結果からは、ブレーキ等の制御時の挙動に対する違和感や不安感、状況説明等について改善の余地を指摘する意見が一部みられた。災害情報と工事情報に起因しない周辺交通状況による手動介入の必要性も確認されたことから、外部情報のみでなく周辺交通環境を含めた総合的な運行判断ロジックの高度化が求められる。

今後の社会実装に向けては、これらの課題に対し、技術開発の継続、運用ノウハウの蓄積、関係者間の連携強化を通じて段階的に取り組んでいくことが重要であり、今後も実証を重ねながら検証を進めていく必要がある。

1. 実証の背景・目的

1.1 実証の背景

バス運転士はバス事業を営むうえでの根幹となるものであるが、近年、全国的に深刻な人手不足が生じており、減便や路線廃止といった影響が各地で顕在化¹している。2024年時点でバス運転士は2.1万人不足しており、2030年には3.6万人に達する見込みとされている。さらに、バス運転士の拘束時間が制限される「2024年問題」を控え、各自治体では喫緊の対応が迫られている。こうした全国的な人手不足の傾向は仙台市においても例外ではなく、運転士不足は大きな問題となっている。近年はライドシェアやデマンド交通等の動きも見られるようになったが、利用者の安全性確保や運賃の高騰等の課題も残っている。このため、地域住民の日常的な移動手段としての路線バスに対する根強い利用ニーズは、今後も続くものと思われる。

本実証の実施地域である仙台圏の路線バスにおいても、宮城交通が運転士不足と燃料費の高騰を鑑み、2025年4月のダイヤグラム改正にて平日24便、土日祝日22便の減便を予定している²。また、仙台市交通局では、運転士採用試験の年齢制限の引き上げや「運転手」から「運転士」への名称変更による意欲向上策等ソフト面での対応も実施しており、少ない人材で、効率的にバス事業を運営するための施策導入が急務の状況である^{3,4}。

今後は、自動運転「レベル4」の営業運行の早期実現に向けて、通信環境と路面センシング、都市OS等との連携を活用し、安全な移動手段の提供を実現できるよう、通信技術を活用した自動運転通信の高度化に取り組むとともに、地域社会における交通の利便性向上の実現に取り組んでいく。

1.2 レベル4自動運転を社会実装するうえでの実証地域における課題

先述の通り、仙台市では、全国的な傾向と同様にバス運転士の確保が課題となっている。これに対処するため、過去にも自動運転バスの導入に向けた積極的な取り組みが行われており、技術の信頼性と安全性を確保することが引き続き求められている状況である⁵。

¹ 東京新聞「路線バス維持へ「戦後最大の危機」 東京でも運転手足りない 廃止・減便・値上げ相次ぐ」

(<https://www.tokyo-np.co.jp/article/283801>), 発行年(2023年), 最終閲覧日 2026年1月26日閲覧

² Tbc 東北放送「仙台圏の路線バス 4月から減便へ「運転士不足や燃料費の高騰など総合的に判断」 宮城交通」

<https://newsdig.tbs.co.jp/articles/tbc/1762198>, 発行年(2025年), 最終閲覧日 2026年1月26日閲覧

³ 河北新報 ONLINE「仙台市バス、運転手は運転「士」も 有資格職の重み強調、意欲向上や人材確保狙う 25年1月から」(<https://kahoku.news/articles/20241230khn000011.html>), 発行年(2024年), 最終閲覧日 2026年1月26日閲覧

⁴ 河北新報 ONLINE「仙台市交通局がバス運転手確保へ応募年齢上限を55歳未満に 秋採用から」

(<https://kahoku.news/articles/20240911khn000102.html>), 発行年(2024年), 最終閲覧日 2026年1月26日閲覧

⁵

仙台市「自動運転実証事業「青葉山グリーン回遊プロジェクト」自動運転レベル2の運行実験を実施します(発表資料)」

(<https://www.city.sendai.jp/sesakukoho/gaiyo/shichoshitsu/kaiken/2024/10/08zidouunten2.html>),

発行年(2024年), 最終閲覧日 2026年1月26日閲覧

本実証対象である秋保ルートでは、毎年 12 月から 2 月にかけて積雪や路面凍結が発生しやすい傾向にある。交通の安全性が大きく影響を受けるため、路面状況を正確に把握し、自動走行制御を実現することが課題であり、リアルタイムでの状況把握と迅速な対応が求められる。また、これらの地域は宮城県沖地震の影響を受けやすいエリアであり、地震対策も重要な課題である。地震発生時には、自動運転車両の安全を確保するため、事前の準備とシミュレーションが求められる。この他、秋保ルートには秋保温泉をはじめとする観光スポットが多く、観光客の増加が見込まれるが、地域住民にとっては公共交通の不足が懸念される。

これらの課題を解決するために自動運転バスに対する需要は高いが、エリアによっては不感エリアや弱電界エリアが存在、また道路が凍結しやすい状況であるため、自動運転バスの実装が困難な状況にある。自動運転バスの実装に向けて、通信環境の整備を行い、レベル4自動運転の安全走行を実現するとともに、モニタリングのための安定した映像データの伝送等、実現に向けた各要素技術の検証が必要である。

1.3 実証の目的

以上のような背景・課題を踏まえ、本実証では災害時や混雑時の自動運転車両の安全な運行を可能とする通信環境の確保を目指す。そのため、複数キャリアネットワークとローカル 5G 等自営網の効率的活用を実施するとともに、ネットワークスライシングによる優先帯域確保を通じて、自動運転走行時の途切れない通信を実現する技術を確認することを目的とする。また、将来的に都市 OS への実装が想定される災害情報や工事情報、路面状況(凍結、積雪)等の環境情報を、自動運転車両の運行に活用することで、より効率的な制御を行うとともに、都市 OS の有効利用に資するユースケースを明らかにすることも目的とする。

レベル4自動運転の実現に必要な通信の安定性を確保するためには、複数キャリアの取り扱い方や実現できる安定性のレベルを明確にすることが重要となる。過去の実証においては複数キャリア間での切り替え方式が検証されてきたものの、ハンドオーバーポイントの算出が必要であることや選択キャリアの瞬間的な通信品質の劣化に対しては対応が難しいという課題があった。そこで本実証では、複数キャリアを併用するアグリゲーション方式を採用するにより、単一キャリアへの依存を回避し、複数キャリアの通信リソースを最大限活用することで、より安定した通信の実現を目指す。また、検証にあたっては、キャリアネットワークとローカル 5G を組み合わせた構成とすることで、既存設備を活用した構成における通信安定性の実現レベルを評価する。

このような実証を通じて、複数キャリアネットワークを活用した途切れない通信が実現されれば、遠隔でのモニタリングや車両制御を安定的に行うことが可能となり、交通事故のリスク低減を通じた安全な移動手段の提供に繋がると考えられる。さらに、不感エリアや弱電界エリアにおいても、ローカル 5G を活用した安定したネットワーク環境が提供されることで、安定した運行が確保された自動運転バスが日常の交通手段として普及が進み、地域全体の交通アクセスの向上が見込まれる。加えて、路側インフラ

から取得される点群データ等を都市 OS と連携させることで、リアルタイムでの状況把握と効率的な制御が可能となり、緊急時の迅速な対応等が実現され、これは現在仙台市が取り組んでいるスマートシティ構築の推進にも寄与すると考えている。

1.4 最終目標・構想イメージ

仙台市では、先端サービス創出等を目的として、東北大学とスマートフロンティア協議会(以下、本協議会)を2022年1月に設立している。本協議会は、2024年2月にレベル4相当の自動運転バス(EVバス)の運行調査を行っており、自動運転に必要な周辺環境のデータ収集・分析を行う他、利用客の需要調査等も行っている。今後も、実証実験を進めていくことを予定している。さらにスマートシティ構想とも協調を図ることで、近隣地区への横展開も期待できるものである。

このような背景を踏まえ、本実証は、安心・安全な自動運転バスの実現と都市 OS との連携によるスマートシティ構想の実現へ寄与することを目指す。この2つの取り組みにおける最終目標・構想としては以下の通りである。

【自動運転通信の高度化】

自動運転の社会実装にあたり、中山間地において単一事業者のキャリアネットワークでは、不感エリアや劣悪なネットワーク環境が存在することが想定され、その対策としてローカル 5G 等によるスポットのエリア補充や、複数セルラー無線をアグリゲーションして無線カバレッジを拡張することが必要である。一方で、複数無線を用いることによる無線切り替えの増加に伴う無線品質の低下を防ぎ、最適無線を予測することで、走行ルート全体での通信品質の向上を図る必要がある。

将来的に様々な地域環境において車両との安定かつ円滑な通信を実現するため、非地上系通信を用いる通信の導入やアグリゲーションするセルラー無線のバリエーションの増加、仮想化技術を用いた RAN~コアネットワーク全体のネットワークのスライシングにおいて、アプリケーション単位や UE 単位でのネットワークリソースの最適化による自動運転通信の高度化を目指す。加えて、車両制御に関わる重要な通信についてはスライシングやリソース最適化の他に、長期的な視点では周波数分割やセンシング等通信用途以外の無線活用を通し、一般ユーザデータの影響を受けない強固な車両制御通信の実現を構想している。

【都市 OS 等との連携を見据えた周辺環境情報の収集・利活用】

都市 OS をはじめとした外部データや周辺環境情報を車両制御に利活用できていないことがレベル4自動運転の社会実装における課題の一つである。最終的な構想イメージとしては、都市 OS と自動運転システムが常時接続され、災害情報や工事情報、路面状況等の外部データ・周辺環境情報がリアルタイムに車両制御へ反映される自動運転サービスの実現を目指す。

本実証では、以下 2 パターンの情報連携による車両制御を検証する。

1. 路面凍結状況に応じた制御

多様な環境センサで路面状態を正確かつリアルタイムにセンシングし、積雪凍結路の危険箇所を事前に判定して可視化することで安全な自動運転を可能とすることを目標とし、その実現に向けて走行道路の実センシングデータに加え、公的機関(気象庁等)からの気象データも考慮したビッグデータに取り組む。時空間的に道路状況を予測・把握し、自動運転走行路の一元的な監視と安全走行への適切な指示・制御を目指す。なお、路面状況の結果については都市 OS 側へアップロードを行う。

2. 災害情報/道路工事状況に応じた制御

自治体が進めているデータ基盤と連携することで、リアルタイムでの状況把握と効率的な制御が可能となり、交通渋滞の緩和や緊急時における迅速な対応を目指す。なお、本実証における災害・道路工事情報は実データではなくダミーデータを用いて実施する。

1.5 「最終目標・構想イメージ」における本実証の位置づけ・目標

仙台市の地域特性を踏まえ、都市 OS を基盤としたデータ連携と強靱な通信基盤のもと、自動運転バスを安全かつ持続的に運行するスマートシティ構想が念頭にある。本実証は、その実現に向けた第一段階として、将来的な社会実装を見据えた基盤技術の有効性を検証する位置づけにある。具体的には、自動運転に必要な通信の安定性を確保するための通信の高度化の検証と、都市 OS 等との連携による外部データや周辺環境情報を活用した車両制御の検証を行う。

【自動運転通信の高度化】

本実証では、複数キャリアのアグリゲーションやローカル 5G の導入を通じて、経済性の高い形で無線カバレッジの拡張を目指すとともに、通信の頑健性の検証に取り組む。

こうした取り組みが求められる背景として、自動運転の実装に向けてはそれぞれの地域環境において、車両との安定かつ円滑な通信を実現するための様々な通信要件が発生することが考えられる。

本実証では、複数キャリア通信とローカル 5G を用いた自動運転車両の通信において、IOWN(協調型インフラ基盤・Cradio)を用いた複数ネットワークのアグリゲーション技術(回線併用)と品質予測に基づくプロアクティブな動的トラフィック制御の仕組みを端末に実装し、単一キャリアでは実現できないエリアカバレッジと安定した通信性能を提供する通信システムの品質、性能評価および、輻輳環境下におけるスライシングによる帯域確保通信の効果、性能評価を行う。

【都市 OS 等との相互連携を見据えた周辺環境情報の収集・利活用】

本実証では、仙台市の地域特性を踏まえ、路面凍結時における自動運転バスの安全な走行に取り組む。

多様な環境センサを装備し、積雪凍結路を走行させた場合のリアルタイムなセンシング(サンプル周期を 1.0 秒以内)と正確な路面状態(乾燥路、湿路、湿潤路、シャーベット、積雪路、凍結路)の判定(判定精度 95%以上)ができていないかを遠隔監視員がモニタリングする。

また、定性的な路面状態に加え、滑り摩擦係数(0~1.0)およびラフネス(凸凹)を定量的に測定することにより、自動運転の凍結・積雪による走行モードへの切り替えの有効性を確認する。

また、仙台市が保有する都市 OS との接続を行い、都市 OS 上のデータや外部データを活用した車両制御の検証にも取り組む。

以上の取り組みを通じて、本実証では、仙台市の地域特性を踏まえた自動運転バスの安全かつ安定的な運行を支える技術の有効性を検証する。併せて、遠隔監視や都市 OS との連携等の運用に必要な機能を、通信システムを通じて実現し、将来的な社会実装へつなげていくため、各分野が今年度を起点として発展していくことが重要となる。

このため、「自動運転」の社会実装を見据え、「通信システム」が支える「遠隔監視」および「都市 OS 連携」について、今年度以降における各分野のロードマップを以下に示す。

【2025 年/本実証】

■自動運転分野

- ・ 外部データ連携基盤(都市 OS 等)と連携して、路面状況(凍結等)、工事情報、災害情報の活用による、路面状況に合わせた、走行可否判断を含む柔軟性のある自動運転車両制御

■通信分野

- ・ マルチキャリア LTE、ローカル 5G 統合による RAN カバレッジ拡張
- ・ 混雑環境および通信データ種別に応じた優先すべき通信におけるスライシング

■ソリューション分野(遠隔監視)

- ・ 車内映像への AI 検知を用いた白杖検知および障がい者乗車状況の把握

■ソリューション分野(都市 OS 連携)

- ・ 自動運転車両から外部データ連携基盤(都市 OS 等)への路面状況(凍結等)共有による他分野データ活用の検討

【2026 年】

■自動運転分野

- ・ デマンド型自動運転と外部データ連携基盤(都市 OS 等)の路面状況(凍結等)、および他デマンド運行車両情報との連携による、ルートの変更および自動運転車両の効率的な配車制御

■通信分野

- ・ 陸上移動可能な低軌道衛星通信およびセルラー5G 統合による RAN カバレッジの更なる拡張
- ・ 自動運転システムやアプリケーション単位でのネットワークリソースの有効利用
- ・ UE 単位で静的に確保されたリソースの有効利用の検証

■ソリューション分野(遠隔監視)

- ・ AI による異常検知および判断の自動化による監視者の負担軽減

■ソリューション分野(都市 OS)

- ・ 自動運転車両の運行情報(遅延等)および除雪車両の運行情報等を外部データ連携基盤(都市 OS 等)への共有による、他車両の運行への活用

【2027年】

■自動運転分野

- ・ 多様な道路環境下における運行監視映像、路側データ、外部データ連携基盤(都市OS等)の連携による、新規通信インフラ設備の敷設を必要としない経済的な複数自動運転車両制御
- ・ 一部オーナーカーからの運行情報の外部データ連携基盤(都市OS等)への共有による、自動運転車両等を含む他車両での活用検討

■通信分野

- ・ NTN(HAPS:高高度プラットフォーム等)および WiGig 等の統合による RAN カバレッジのさらなる拡張
- ・ モバイルインフラシェアによるコアネットワークオフローディング
- ・ 動的なエンドツーエンド通信リソース最適化(RAN~コアのオーケストレーション)

■ソリューション分野(遠隔監視)

- ・ AI 精度および活用パターン拡大による、安全観点での倒れこみ検知および運行観点での乗車人数把握
- ・ モニタリングのさらなる効率化および冗長化

■ソリューション分野(都市OS)

- ・ 自動運転車両の LiDAR 等で取得した点群情報等を外部データ連携基盤(都市OS等)への共有による、道路等のインフラ管理および都市整備への活用

2. 業務実施体制

2.1 実証機関

実証機関は、下記の通り。

表 1 実証機関概要

代表機関	法人名	NTTドコモビジネス株式会社 東北支社
	代表者氏名	鈴石 建一
	所在地	〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉丁目1番2号 ドコモ東北ビル
	業務の概要	実証事業の全体統括
構成員	法人名	株式会社 NTT ドコモ
	代表者氏名	前田 義晃
	所在地	〒100-6150 東京都千代田区永田町2丁目 11 番1号 山王パークタワー
	業務の概要	通信技術実証環境の構築
	構成員とする理由	自動運転遠隔監視における高信頼通信について実績を有するため。
構成員	法人名	NTT アドバンステクノロジー株式会社
	代表者氏名	伊東 匡
	所在地	〒163-1436 東京都新宿区西新宿3丁目 20 番2号 東京オペラシティタワー
	業務の概要	通信技術実証の実施
	構成員とする理由	IOWN における無線システムの開発、評価、検証ノウハウを有するため。
構成員	法人名	ドコモ・テクノロジー株式会社
	代表者氏名	中村 寛
	所在地	〒100-6150 東京都千代田区永田町2丁目 11 番1号 山王パークタワー16 階
	業務の概要	通信技術実証の実施
	構成員とする理由	5G 技術を用いる端末の開発と応用について多岐にわたる実績を有するため。
構成員	法人名	株式会社 NTT データ経営研究所
	代表者氏名	山口 重樹

	所在地	〒102-0093 東京都千代田区平河町2丁目7番9号 JA 共済ビル9階・10 階
	業務の概要	実証事業の全体統括支援
	構成員とする理由	過去、多数の国が所管する実証プロジェクトのプロジェクトマネジメントを実施しており、コンソーシアム構成員を取り纏め、円滑な実証事業の遂行に寄与できると考えるため。
構成員	法人名	株式会社タケヤ交通
	代表者氏名	大宮 利幸
	所在地	〒989-1501 宮城県柴田郡川崎町大字前川字中道南3丁目4番地
	業務の概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 帰庫点検 ・ 自動運転バスの運行 ・ 運行監視システムの運用およびモニタリング
	構成員とする理由	当該運行エリアにおいて、路線バスの運行および実証運行を実施した経験があり、かつ道路状況や交通状況等にも精通しているため。
構成員	法人名	先進モビリティ株式会社
	代表者氏名	瀬川 雅也
	所在地	〒300-2646 茨城県つくば市緑ヶ原4丁目 13 番地
	業務の概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 帰庫点検 ・ Lv2自動運転バスの提供 ・ 走行環境にあわせた自動運転システムの調整および運行担当運転士への操作トレーニング
	構成員とする理由	一般道、混在交通環境における大型自動運転車両の実証実験の実績を多数有するため。
構成員	法人名	パナソニックコネクト株式会社
	代表者氏名	樋口 泰行
	所在地	〒104-0061 東京都中央区銀座8丁目 21 番1号 住友不動産汐留浜離宮ビル
	業務の概要	バス車内の AI システム構築
	構成員とする理由	AI による人物検知は公共分野での納入実績があり、その技術を活用してバス車内のカメラ映像から乗客の様子等を検知する AI システムを提供できるため。

2.2 実施体制図

本実証における実施体制図は、下記の通り。

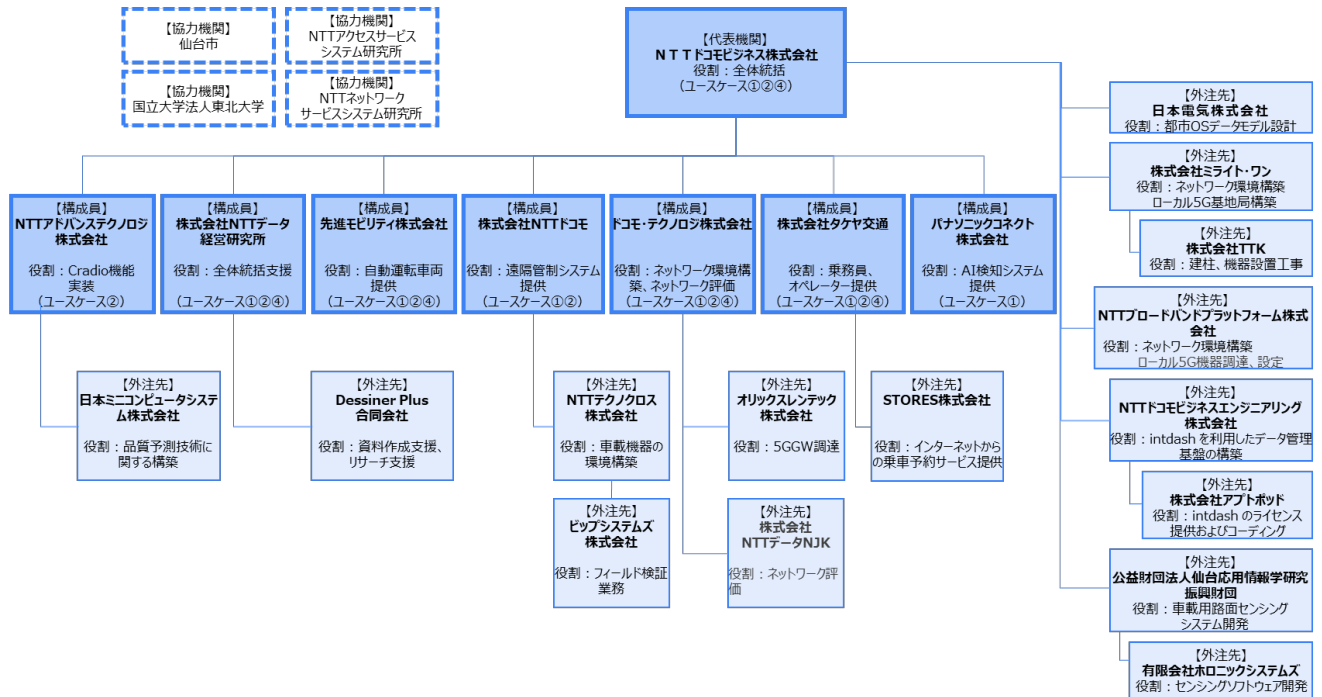


図 1 実施体制図

3. 自動運転の運行結果

3.1 運行場所

今回の実証における東部北の運行ルートについて、以下に示す。

■東部北ルート

当該ルートでは、「三井アウトレットパーク仙台港」から、「夢メッセみやぎ」を経由し「仙台港フェリーターミナル」で折り返しを行い、「仙台港中央公園」、「仙台うみの杜水族館」、JR 仙石線「陸前高砂駅」を経由したうえで「三井アウトレットパーク仙台港」まで戻る全長約10kmの走行を実施した。また、当該ルートでは、自動運転レベル2で走行し、信号のない横断歩道付近に人がいれば安全のため手動介入した。なお、遠隔監視装置は沿線の三井アウトレットパーク仙台港へ設置した。

当該ルートは、スライミング機能が具備された基地局で通信できるルートであり、大規模な展示会の他、コンサート等の様々なイベントの会場となる夢メッセみやぎが所在しているため、混雑地域でのネットワーク検証に向いている。また、当該ルートの仙台東部道路より海側は、東日本大震災時に浸水したエリアであり、将来的なレベル4自動運転の社会実装の際には災害対策が必須となるため、本実証によって災害時の車両制御の確実性を上げることに取り組んだ。



図 2 東部北の走行ルート(地理院地図:<https://maps.gsi.go.jp/>)

今回の実証における秋保の運行ルートについて、以下に示す。

■秋保ルート

当該ルートでは、「秋保・里センター」から「仙台市秋保市民センター」、「秋保神社」を経由し「秋保大滝」で折り返しを行い、「仙台市馬場市民センター」を経由したうえで「秋保・里センター」まで戻る全長約29kmの走行を実施した。また、当該ルートでは、自動運転はレベル2で走行し、信号のない横断歩道付近に人がいれば安全のため手動介入した。なお、遠隔監視装置は沿線の秋保・里センターへ設置した。

当該ルートは、冬季(11月～3月)においては、走行路面の積雪凍結状態が想定されるため、路面凍結を中

心に実証を行った。なお、当該エリアでは本実証を実施した1月中に、例年複数回の路面凍結が発生している。路面凍結の実証について、路面状態(乾燥路、湿路、湿潤路、シャーベット、積雪路、凍結路)は、多様な環境センサをレンタカーに装着して走行し、リアルタイム(サンプリング周期 1.0 秒以内)でセンシング判定および、滑り摩擦係数(0~1.0)、加えてラフネスを定量的に測定することによる判定を実施した。なお、センサ類は強力マグネット式で簡単に着脱が可能であるため汎用性が高く、他の車両に装着してセンシングすることも可能である。



図 3 秋保の走行ルート(地理院地図:<https://maps.gsi.go.jp/>)

3.2 運行期間

運行期間は、下記の通り。

表 2 運行期間

運行内容	運行期間・運行日数
準備運行	<ul style="list-style-type: none"> ■ 東部北ルート 11月11日~11月20日(土日除く) 計8日間 ■ 秋保ルート 12月10日~1月16日(土日含む) 計20日間
関係者試乗運行	<ul style="list-style-type: none"> ■ 東部北ルート 11月21日~11月28日(土日除く) 計5日間 ■ 秋保ルート 1月19日~1月23日 計5日間
一般運行等	<ul style="list-style-type: none"> ■ 東部北ルート 12月1日~12月9日(土日含む) 計7日間 ■ 秋保ルート 1月24日~1月30日(土日含む) 計7日間
その他運行	無し

3.3 運行時間帯・頻度・運行方式

■東部北ルート

- 運行時間帯:10時～15時
- 頻度:1本/60分
- 一般試乗期間の運行便数:災害シナリオ便12便、工事区画回避シナリオ19便
- 運行方式:路線バス方式

■秋保ルート

- 運行時間帯:10時～15時
- 頻度:1本/120分
- 一般試乗期間の運行便数:往路21便、復路21便
- 運行方式:路線バス方式

3.4 運行者

株式会社タケヤ交通

3.5 運行体制

運行体制は、下記の通り。

表 3 運行体制概要

項目		内容
運行管理者の選任・人員体制		タケヤ交通本社営業所の運行管理有資格者と補助者(常時計2名以上) ※当該自動運転バスの出庫から帰庫までの運行管理を担当
遠隔監視設備	種類・特徴	車体全方位(前方/側方/後方/車内)のカメラ映像の画面表示
	機能	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔監視装置への車両周囲全体および車内映像の表示 ・ 自動運転車両の車両情報を映像とともに表示 ・ 車内映像に白杖検知結果の表示
	設置場所	<東部北ルート> 三井アウトレットパーク仙台港 <秋保ルート> 秋保里センター
遠隔監視員	事業者	株式会社タケヤ交通
	人員体制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔監視員:2名 ・ 自動運転車両1台あたりの配置人数:2名
	オペレーション	自動運転車両に取り付けられたカメラや音声等の情報について、監

		視員が遠隔監視装置を通じてモニタリングを実施。
	遠隔監視体制	常時2名体制で実施。 ※交代で本監視者、準監視者役を担当。
	業務従事者教育	下記のように、自動運転バスの安全な運行に必要な知識と技術を習得。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔監視画面の情報を通じた車内外状況のリアルタイムでの把握 ・ 車内外状況の判断 ・ 異常発生時、速やかに定められた連絡先に連絡をとる等の適切な対応
テスト ドライバー	事業者	株式会社タケヤ交通
	人員体制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自動運転車両1台あたりの配置人数:3名(交代・休憩・病欠への備え) ・ 運転士の延べ人数:10名 ・ 教育係:3名
	オペレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・ 事前指導 ・ 点呼 ・ 出庫前点検 ・ 営業所から実証実験場所の回送 ・ 実証走行 ・ 乗務記録 ・ 帰庫点検 ・ 給油
	テストドライバーの確保およびこれらに対する業務従事者教育・訓練の実績	<ul style="list-style-type: none"> ■ テストドライバーの確保 タケヤ交通の路線バスでの運転業務の経験を有し、かつ今回の実証運行のルートでの乗務経験が豊富な運転士を確保。 ■ 教育・訓練の実績 3名1組で2～3日程度下記の訓練を実施。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 自動運転システムを提供する協業者によるシステムや操作方法のレクチャー ・ 自動運転バス操作経験者による危険箇所、緊急時対応のレクチャー ・ 上記3項目を踏まえた実施訓練
保安員 (※上記以外で 運行の安全の ために配置する 人員)	事業者	株式会社タケヤ交通
	人員体制	<ul style="list-style-type: none"> ・ 保安員の人数:3名 ・ 自動運転車両1台あたりの配置人数:2名(交代・休憩・病欠への備え)
	オペレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自動運転システムを提供する協業者によるシステムや操作方法のレクチャー

		<ul style="list-style-type: none"> ・ テストドライバー補助 ・ 車内アナウンス ・ 乗客介助 ・ 車両移動
	業務従事者教育	<p>下記のように、自動運転バスの安全な運行に必要な知識と技術を習得。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 自動運転バス特有の機器の把握 ・ 自動運転バスのシステムの理解 ・ 緊急時対応 ・ テストドライバーと同等の運転操作 ・ 乗客とのコミュニケーション方法

3.6 自動運転車両の特徴

自動運転車両の特徴は、下記の通り。

表 4 自動運転車両概要

項目		内容
台数		1台
所有者		先進モビリティ株式会社
車両 スペック	車両名	ポンチョ
	自動運転レベル	レベル2
	車両定員	34人
	試乗枠の定員	11人
	最高速度	車両機能上限:80km/h
		実証実験時上限:60km/h
	センシングデバイス	3DLiDAR:8台、物体検知カメラ:10台
車両性能	<ul style="list-style-type: none"> ・ 走行中に自動運転と手動運転を切り替えることが可能な遠隔型自動運転システムを備えた車両 ・ 自動運転レベル2以上での走行が可能であり、かつ将来的に車両調整等によりレベル4自動運転での走行が可能な車両 ・ 実証地域にて将来的に実装することを想定した場合の乗車人数が乗車可能な車両 	

	運行管理システム		<ul style="list-style-type: none"> ・ 車両に搭載したカメラによる車両内外の遠隔監視 ・ 緊急時における車内との通話 ・ 速度や位置等の車両走行状態のリアルタイムでの取得 ・ 実験車両に車両周辺の状況や車両状態情報の記録を行うドライブレコーダーやイベントデータレコーダー等の搭載 <p>※公道実証実験中の実験車両に係るセンサ等により収集した車両状態情報を含む各種データ、センサの作動状況等について、交通事故または交通違反が発生した場合の事後検証に利用することが可能な方法により、適切に記録・保存</p>	
	その他装備		-	
走行可能環境	天候		晴天、曇天、雨天(小雨)	
	照度		130lx 以上	
保有機能	自転車操作	左折	走行可否	可
		右折	走行可否	否
		車線変更	走行可否	可(特定の条件下でのみ可)
		障害物回避	対応可否	可(特定の条件下でのみ可)
	対象認識		4輪車、2輪車、人、三角コーン	
	白線認識		可	
	標識認識		否	
	信号認識		可	
MRM		否(レベル2のため)		
本実証のために実施する自動運転システム改修の内容		-		
その他特徴等		-		

3.7 自動運転に関する手続き

実施にあたって、下記の報告および許可申請を実施。

表 5 自動運転に関する許可申請概要

申請先・調整先	申請内容・調整内容
宮城県警	実証内容について下記を報告。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 期間

仙台東警察署	<ul style="list-style-type: none"> ・ 場所 ・ 体制 ・ 実施内容 ・ 車両 ・ 自動運転システム機能概要 ・ 遠隔監視システム概要 ・ 安全確保措置
仙台南警察署	
東北運輸局	
	<p>管轄警察署に対して、下記の書類について許可申請を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 道路使用許可申請書
仙台市	<p>下記の書類について許可申請を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 道路占用許可申請書 ・ 都市公園占用許可申請書 ・ 行政財産目的外使用許可申請書 ・ 行政財産目的外使用料減免申請書 ・ 市税納付状況確認同意書 ・ 現状変更等許可申請書 ・ 特別地域内工作物 新築(改築・増築)許可申請書
仙台塩釜港湾事務所 ※仙台港中央公園指定管理者	<p>下記の書類について許可申請を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 港湾施設用地使用(工作物等設置)許可申請書 ・ 港湾施設用地使用料減免申請書
東日本旅客鉄道株式会社 東北本部	<p>下記の書類について許可申請を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 「仙石線陸前高砂駅駅前広場管理運営に関する協定書」に基づく協議書

3.8 自動運転の走行結果

各ルートの走行において、往路・復路それぞれの走行結果(地点ごとに自動走行した回数をカラーマップで表示したもの)を示す。

■秋保ルート(往路)

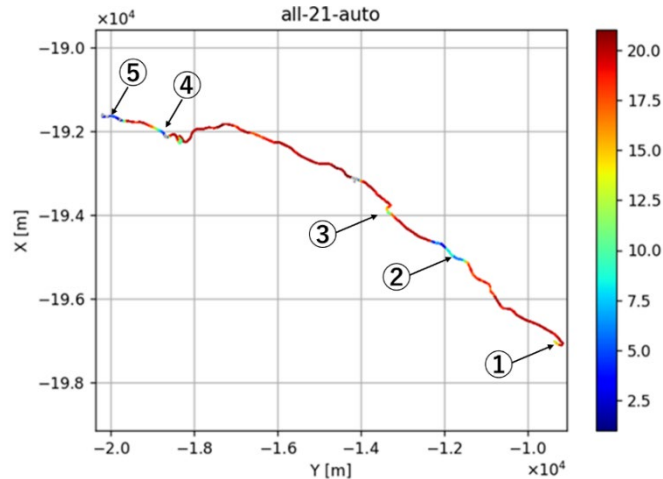


図 4 秋保ルート(往路)の走行結果

秋保ルートの往路における走行結果は以下の通りであった。手動介入が発生したポイントの原因考察を示す。

- ① 車線が狭隘のため、大型の対向車が来た場合に安全のため手動介入を実施した。
- ② 道路工事により片側交互通行となっていたため、手動にて工事区間の走行を実施した。
- ③ 道路工事により片側交互通行となっていたため、手動での工事区間の走行を実施した。
- ④ 道路上にはみ出す枝があったため、安全のため手動介入を行い、回避を実施した。
- ⑤ 除雪作業により路肩へ寄せられた雪の一部が走行車線にはみ出していた区間において、当該雪を異物として検知する事象が発生した。円滑な走行継続が困難となる場面があったことから、状況に応じて手動介入を実施した。

■秋保ルート(復路)

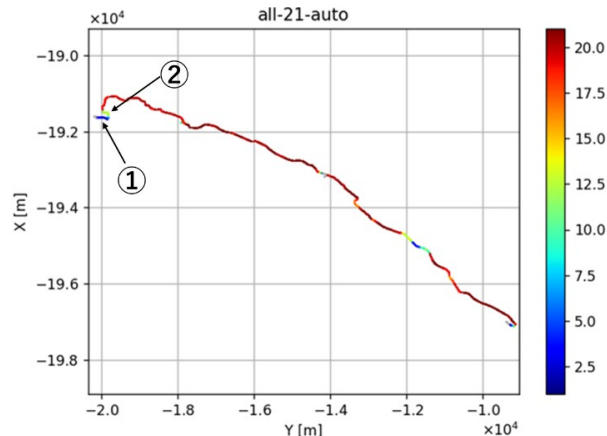


図 5 秋保ルート(復路)の走行結果

秋保ルート(復路)における走行結果は以下の通りであった。手動介入が発生したポイントの原因考察を示す。

- ① 除雪作業により路肩へ寄せられた雪の一部が走行車線にはみ出していた区間において、当該雪を異物として検知する事象が発生した。円滑な走行継続が困難となる場面があったことから、状況に応じて手動介入を実施した。
- ② 車線が狭隘のため、対向車が来た場合に安全のため手動介入を実施した。

■東部北ルート(災害シナリオ時)

東部北ルートの災害シナリオ時における走行結果は以下の通りであった。手動介入が発生したポイントの原因考察を示す。

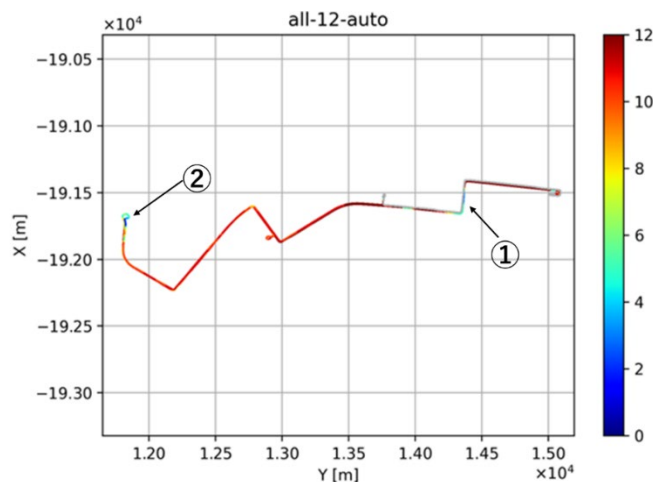


図 6 東部北ルート(災害シナリオ時)の走行結果

- ① トラック等の路上駐車車両を回避する際に手動介入を行った。
- ② バス停や陸前高砂駅のロータリーから出る際の動線上に駐車している車を避ける場合手動介入を行った。

■東部北ルート(工事区画回避シナリオ時)

東部北ルートの工事区画回避シナリオ時における走行結果は以下の通りであった。手動介入が発生したポイントの原因考察を示す。

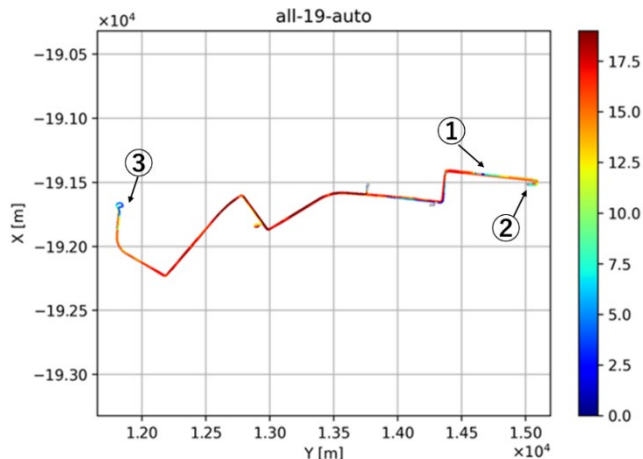


図 7 東部北ルート(工事区画回避シナリオ時)の走行結果

- ① 車線変更時に並走車が走行していた場合等に手動介入を行った。
- ② バス停から出口に向かう際の動線上の車を避ける際に手動介入を行った。
- ③ バス停や陸前高砂駅のロータリーから出る際の動線上に駐車している車を避ける場合手動介入を行った。

4. 実証の手法

4.1 ①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保

4.1.1 中山間地におけるキャリアネットワークの不感エリア対策として、自営ネットワークを協調型インフラ基盤×Cradioにより組み合わせた通信接続性検証(秋保)

1) 目的

自動運転バスの社会実装を実現するにあたり、中山間地の無線環境において単一 RAN でバス走行ルート全域をカバーするのは難しく、自動運転車両との通信不能によりモニタリング不能、車両制御不能といった問題が懸念される。そのため、社会実装の実現には、不感エリアを解消するローカル 5G 等の活用によるスポットのエリア補完や、複数セルラー無線をアグリゲーションし無線カバレッジを拡張する等の対策が必要となる。

将来的に様々な地域環境において車両との安定かつ円滑な通信を実現するため、本ユースケースでは、モバイル通信事業者間のインフラシェアやモバイル通信事業者のコア設備を共用した低コストであるローカル 5G の導入により、経済性の高い形での無線カバレッジの拡張を目指した。

2) 実証内容の詳細

上述で示した通り、中山間地におけるキャリアネットワークの不感エリア対策として、自営ネットワークを協調型インフラ基盤×Cradio を用いて組み合わせ、安定した通信の実現と、常時接続性による不感エリアの解消を目指した。

具体的な実施手順は以下の通りである。

まずは、Cradio による通信品質予測技術を開発し、複数ネットワークにまたがる無線区間の通信品質を予測できるか動作評価を行った。あわせて、協調型インフラ基盤におけるマルチパス転送ゲートウェイ(GW)、協調制御 GW、ネットワーク品質の推定を行う QIM 技術を開発し、エンドツーエンドのネットワーク品質予測、デバイス-MEC(Multi-access Edge Computing)間の制御情報流通、複数ネットワークの通信リソースが動的に運用可能かについて確認した。

次に、Cradio と協調型インフラ基盤の連携機能を開発し、無線品質予測を考慮したネットワーク制御が可能であるか動作評価を行った。この際、ローカル 5G 有無のそれぞれの条件で位置情報と受信電力を測定し、複数キャリアネットワークおよびローカル 5G を用いた場合のエリアカバー率が 92%以上となっているかについて確認を行った。また、協調制御を行わず単一无線でエリアカバーした場合の割合と比較し、品質予測に基づく適切な通信制御が実現できているかについても評価した。なお、走行ルート上でローカル 5G またはキャリアの周波数において、最低受信感度 -126 dBm を上回るエリアをカバーエリアと定義した。

最後に、ローカル 5G と協調型インフラ基盤×Cradio を組み合わせた構成において、車両制御(凍結モード走行への切り替え)および遠隔監視業務の実施可否を評価した。ローカル 5G エリア内およびキャリアネットワークとの重畳エリアにおいて、自動運転バス運行に必要な常時映像監視および車両制御が

可能であるかを、交通事業者による定性的評価により確認を行った。

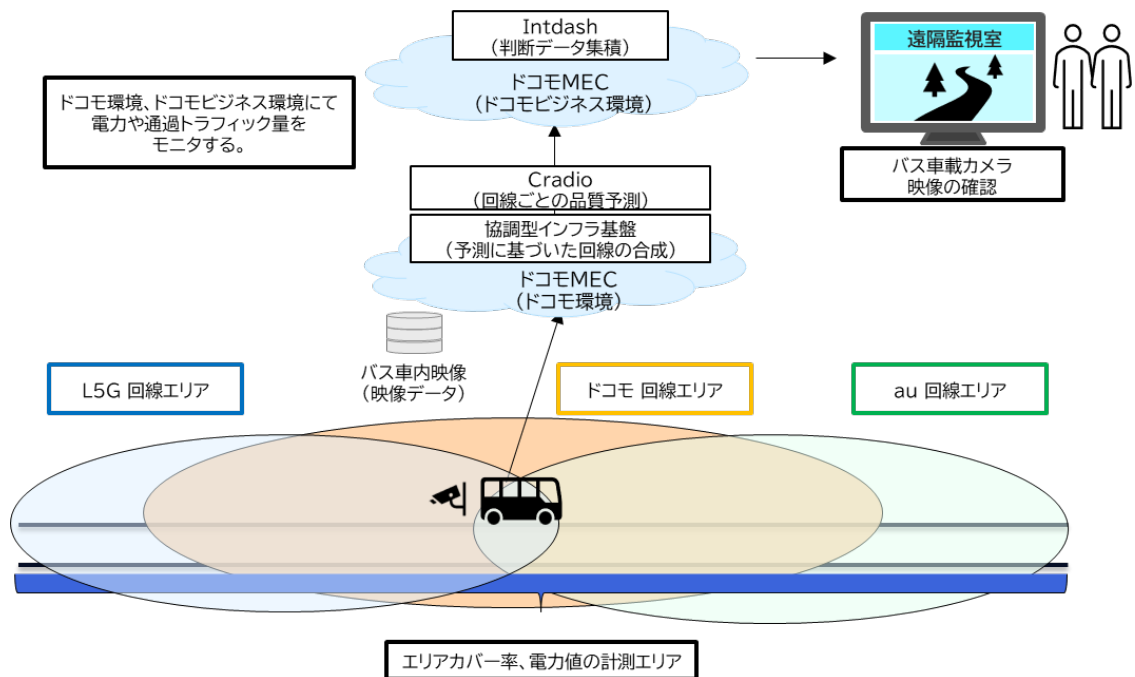


図 8 ユースケース①・秋保ルートにおけるシステム構成

3) 利用技術

レベル4自動運転の実現にあたっては、安定した通信の実現が肝要だと考えられる通信エリアをカバーするため、本実証では以下の2つの通信技術を活用した。

- 1 5G 技術(ローカル 5G)
- 2 協調型インフラ基盤(Cradio 含む)

それぞれの通信技術を選択した理由について、以下に示す。

1 5G 技術(ローカル 5G)

ローカル 5G は、地域や各種産業における個別の要求・需要に応じて企業や自治体等が自ら構築する 5G ネットワークとして、キャリア 5G とは関係なく必要な場所に 5G ネットワークを構築可能である。ローカル 5G はネットワークの用途に応じて通信性能をカスタマイズでき、上りのトラフィック需要にも柔軟に対応できるうえ、通信障害や災害等の影響を受けにくく、通信の継続性を得やすい。また、専用のライセンスバンドを使用することで干渉問題を極力回避した安定した通信が可能である。

以上のような特長を有するローカル 5G は、全国の様々な環境でのサービス化が想定される自動運転システムにおいて、より安定かつ高品質なモニタリング映像の無線伝送を可能としながら、安全かつスムーズな運行の実現に資するため、採用した。

2 協調型インフラ基盤(Cradio 含む)

複数キャリアを用いて通信を安定化させるためには、端末がキャリア間の接続を能動的に切り替える等の対応が必要になる。協調型インフラ基盤は、Cradio によるネットワーク品質予測に基づいて複数の異種ネットワーク(キャリア通信、ローカル 5G 等)をパケット単位で動的に最適振分をする技術である。本技術を用いることで、特定の通信キャリアのネットワークやローカル 5G の敷設状況に関わらないカバレッジの拡大を実現することが可能である。

本実証においては、協調型インフラ基盤によりアグリゲーションされる無線通信に関する情報を通信ルータから取得し、センターサーバに設置する CradioNW 判定機能に送信した。その無線情報に基づいて無線品質を予測し、その結果を車載器内に構築する協調型インフラ基盤上の協調制御 GW に通知することで、アグリゲーションされたマルチ無線通信の中でパケットの最適な振り分け制御を行った。

4) 必要性・緊急性・新規性

【必要性】

実証地域(秋保ルート)のような条件不利地域(トンネル、中山間地)では、単一キャリアで安定した常時モニタリングを実現することが困難なため、複数キャリアの無線エリアを重畳し、自動運転システムの通信接続性を担保した。

【緊急性】

自動運転の早期の社会実装を実現するためには、新規の設備投資を抑える等の経済合理性のある実現方式が必要である。したがって、公衆網とローカル 5G を組み合わせることで既存設備を有効活用し、安定した通信の実現を目指した。

【新規性】

公衆網・ローカル 5G 網のカバレッジ境界における通信の安定性を確保するため、公衆網・ローカル 5G 網を併用する協調型インフラ基盤は新規性と必要性を兼ねた。受信電力を測定位置に紐付けずに機械学習モデルで学習する手法を用いることで未走行の場所での品質予測精度を向上させる新規技術も検証した。

5) 検証条件

中山間地におけるキャリアネットワークの不感エリア対策として、自営ネットワークを協調型インフラ基盤×Cradio を用いて組み合わせ、安定した通信を実現：

Cradio および協調型インフラ基盤を MEC 上に実装し、キャリアネットワークとローカル 5G を連携させる。自動運転バスは中山間地におけるキャリアネットワークの不感エリアを含めた走行ルート上を走行し、通信品質を確認するため、ローカル 5G 有り無しの場合の位置情報と受信電力を確認する。

また、ローカル 5G がある場合のルート全長に対する無線通信の電波強度やスループットを測定し、その常時接続性を検証する。

6) 開発・評価項目

表 6 ユースケース①における開発・評価項目

番号	開発・評価項目
(1)	複数キャリアネットワークとローカル 5G を協調型インフラ基盤×Cradio を用いたシステムの開発
(2)	位置情報と複数キャリア・ローカル 5G の受信電力の計測
(3)	複数キャリアネットワークとローカル 5G の重畳エリアにおける常時映像監視・車両制御の実施可否の計測

(1) 複数キャリアネットワークとローカル 5G を協調型インフラ基盤×Cradio により組み合わせたシステムの開発

本テーマでは、中山間地のキャリアネットワークの不感エリア対策として、自営ネットワークであるローカル 5G を導入した。公衆網とローカル 5G 網は、公衆・閉域の違いから、ユーザが使用できる帯域の大きさや時間変動が大きく異なる。このため、両者を併用する場合、特にカバレッジ境界において、適切なバランスでトラフィックを流さないと通信が途切れるリスクがある。そのため、公衆網とローカル 5G 網のネットワーク品質を予測する Cradio を開発した。さらに、Cradio による事前予測だけでなく、現地の車両からの遠隔監視映像をパッシブ計測し、車両位置とネットワーク品質の紐付けから映像伝送時の通信品質を予測する QIM(Quality Index Map)も開発、併用することで、予測値と実測値に基づいた複数回線へのパケット振り分けを協調型インフラ基盤にて実施する。この技術を用いることにより、パケットレベルで複数回線を併用するアグリゲーション方式が可能となり、将来の品質劣化や瞬間的な品質劣化に対応し、広帯域な通信を実現することを目指している。

ユースケース1では、本機能を接続性の観点で利用する。実際の検証は、(2) 位置情報と複数キャリア・ローカル 5G の受信電力の計測として実施する。

(2) 位置情報と複数キャリア・ローカル 5G の受信電力の計測

実証を行う秋保ルートでは、温泉街となる山の麓(秋保・里センター)から観光地となる山の中腹部(秋保大滝)までの片道約 15km のルートを走行する。このルートは、カーブや高低差を含む入り組んだ道路となっており、公衆網の電波が十分に到達するエリアと不十分なエリアを含んでしまう。このようなエリアでは、受信電力の強弱で無線の帯域幅、変調方式や符号化率が変化してしまうため、エリアによるスループットの速度差が生じてしまう。そこで、ルート上の受信電力を計測し、ルート全域の特性を明らかにする。計測方法は以下とする。

①位置情報の計測

実際に走らせるバスには、位置情報を取得する GPS モジュールを搭載しており、常時システム内で位置情報が流通している。本計測では、この情報をロギングすることで計測を実施する。

②受信電力の計測

今回使用するモバイルルータは、SSH 接続により内部情報を収集することができる機能が具備されている。本計測では、1秒ごとに収集機能を実施し、ロギングすることで計測を実施する。本実証では、ドコモ回線、au 回線、ローカル 5G 回線の3回線を検証ターゲットとしているため、3回線の受信電力とし

て、受信電界強度(Reference Signal Received Power (RSRP))を個別に取得する。

③位置情報と受信電力の対応付け

①で取得する位置情報と②で取得する受信電力情報は、時刻情報も一緒に取得している。個別に取得したデータを突合することで、時刻、位置、受信電界強度の関係性をまとめる。

(3) 複数キャリアネットワークとローカル 5G の重畳エリアにおける常時映像監視・車両制御の実施可否の計測

本項目においては、複数キャリアネットワークおよびローカル 5G が重畳する環境下での常時映像監視および車両制御の実施可否について、遠隔監視業務を実施した交通事業者へのアンケートを通じて、通信継続性や操作上の支障有無等の観点から定性的に評価する手法とした。

7) KPI/KGI

表 7 ユースケース①における KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	ローカル 5G エリアおよびキャリアネットワークの重畳エリアにおける自動運転バスの運行について、常時映像監視が可能であること。
	(2)	ローカル 5G およびキャリアネットワークが重畳した路面凍結路において、路面状況判断システムのアシストにより車両制御が可能であること。
定量評価	(3)	複数キャリアネットワークとローカル 5G を統合し、エリアカバー率が 92% になること。

(1) ローカル 5G エリアおよびキャリアネットワークの重畳エリアにおける自動運転バスの運行について、常時映像監視や車両制御が可能であること。【定性評価】

良好な自動運転車両の走行を実現するにあたり、安全性の観点から遠隔監視員による適切な判断が求められる。従って、コンソーシアム側で構築したキャリアネットワークおよびローカル 5G の重畳エリアにて、常時映像監視が可能であることを目標値とした。

具体的には、遠隔監視員2名以上にヒアリングを実施し、自動運転バスの安全な運行にコンソーシアム側で構築したキャリアネットワークおよびローカル 5G が寄与しているか、また運行上の課題等を確認した。

(2) ローカル 5G およびキャリアネットワークが重畳した路面凍結路において、路面状況判断システムのアシスト内容により車両制御が可能であること。【定性評価】

自動運転バスの制御によって乗客の安全を確保するためには、路面凍結した環境での走行においても、遠隔からの車両制御が不能状態にならない通信環境が必要となる。従って、自動走行が困難な路面

凍結路においても走行を可能とするため、路面凍結エリアにローカル 5G およびキャリアネットワークが重畳した環境を構築し、路面状況判断システムのアシスト内容が実際の路面条件に対して妥当であることを目標値とした。

具体的には、車両制御後に走行ルートおよび路面状況を確認し、適切な車両制御が可能であるかの判断を行った。

(3) 複数キャリアネットワークとローカル 5G を統合し、エリアカバー率が 92%になること。

【定量評価】

同一路線における測定では、docomo 回線は KDDI 回線に比べ平均値・中央値・ピーク値のいずれも高いスループットを示した。一方で、両回線とも 5%ile(データセット内で下位 5%)は 0.1Mbps 未満となっており、短時間の通信断が発生する区間が存在した。

コンソーシアムメンバーの測定実績・経験に基づき、地方中山間部での単キャリア(ドコモ)でおよそ 90%をカバーできると想定。加えて、単キャリアで拾えない地点(カバーされていない部分)の一部は他キャリア(au)またはローカル 5G で補完可能であり、+2%以上の改善が期待できる。例えば、ドコモ回線が不良な場合でも au 回線で受信電力を確保できる。

4.2 ②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保

4.2.1 協調型インフラ基盤× Cradio による複数キャリアネットワークの通信リソース統合の最適化検証

1) 目的

先述の通り、自動運転バスの社会実装を実現するにあたり、中山間地における単一事業者のキャリアネットワークでは、不感エリアや劣悪なネットワーク環境といった阻害要因の存在が課題となる。ユースケース1では、ローカル 5G 等の活用によるスポットのエリア補完や、複数セルラー無線をアグリゲーションし無線カバレッジの拡張を行うが、複数無線通信を用いることによる無線切り替えの増加に伴う無線品質の低下を防ぐ必要がある。

本ユースケースでは、モバイル通信事業者間のインフラシェアやローカル 5G を活用しつつ、モバイル通信同士のオフローディングによる頑健な通信の構築を行った。最適無線を予測することにより、走行ルート全体での通信品質の向上させることで、安定性の高い車両運行実現を目指した。

2) 実証内容の詳細

中山間地における通信帯域確保が難しい環境下において、協調型インフラ基盤×Cradio により複数キャリアネットワークの帯域を統合し最適に分散することで、自動運転バスの遠隔監視に十分利用可能な安定した通信帯域の確保・広帯域化を行った。また、走行ルート上におけるスループットの測定を行い、有効性を検証した。

具体的な実施手順は以下の通りである。

まず、Cradio による通信品質予測技術を開発し、受信電力およびスループットに影響を与える無線パラメータに基づき、無線区間の通信品質予測データが出力されるか動作評価を行った。併せて、協調型インフラ基盤においてマルチパス転送ゲートウェイ(GW)、協調制御 GW および QIM 技術を開発し、エンドツーエンドのネットワーク品質予測、デバイス-MEC 間の制御情報流通、複数キャリアネットワークの通信リソースが動的に運用されているかの確認を行った。

次に、Cradio と協調型インフラ基盤の連携機能を開発し、無線品質予測を考慮した統合制御が可能であるかの動作評価を行った。その際、統合制御の有無それぞれの条件で位置情報とスループットを計測し、統合制御ありの場合に所望スループット以上のスループットが得られること、ならびに統合制御無しの場合に所望スループットを下回らない場所率と比較して改善が得られていることを確認した。

最後に、複数キャリアネットワークのカバレッジ内において伝送後の映像品質を評価し、自動運転バス運行に必要な常時映像監視および車両制御が実現可能であることを検証した。当検証は、交通事業者による定性的な判断により行い、複数キャリアネットワーク環境下での運行要件を満たしていることを確認した。

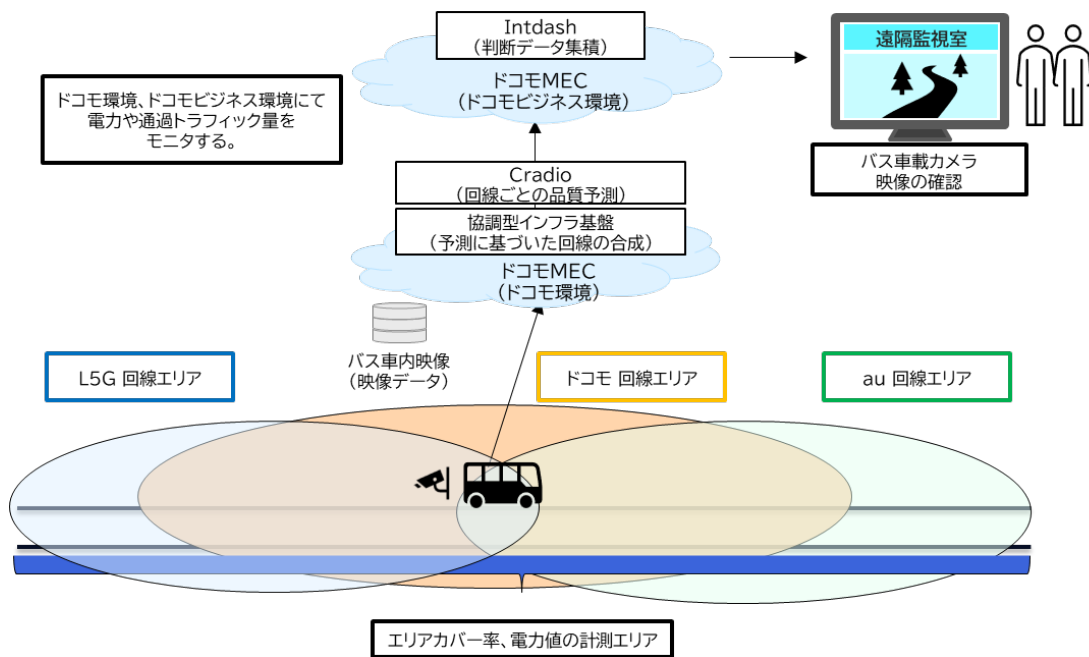


図 9 ユースケース②・秋保ルートにおけるシステム構成

3) 利用技術

レベル4自動運転の実現にあたっては、安定した通信の実現が肝要だと考えられる通信エリアをカバーするため、本実証では以下の2つの通信技術を活用した。

- 1 5G 技術(ローカル 5G)
- 2 協調型インフラ基盤(Cradio 含む)

それぞれの通信技術を選択した理由について、以下に示す。

1 5G 技術(ローカル 5G)

ローカル 5G は、地域や各種産業における個別の要求・需要に応じて企業や自治体等が自ら構築する 5G ネットワークとして、キャリア 5G とは関係なく必要な場所に 5G ネットワークを構築可能である。ローカル 5G はネットワークの用途に応じて通信性能をカスタマイズ可能であり、上りのトラフィック需要にも柔軟に対応できるうえ、通信障害や災害等の影響を受けにくく、通信の継続性を得やすい。また、専用のライセンスバンドを使用することで干渉問題を極力回避した安定した通信が可能である。

以上のような特長を有するローカル 5G は全国の様々な環境でのサービス化が想定される自動運転システムにおいて、より安定かつ高品質なモニタリング映像の無線伝送を可能とし安全かつスムーズな運行の実現に資するため、採用した。

2 協調型インフラ基盤(Cradio 含む)

複数キャリアを用いて通信を安定化させるためには、端末がキャリア間の接続を能動的に切り替える等の対応が必要になる。協調型インフラ基盤は、Cradio によるネットワーク品質予測に基づいて複数の異種ネットワーク(キャリア通信、ローカル 5G 等)をパケット単位で動的に最適振分をする技術である。本技術を用いることで、特定の通信キャリアのネットワークやローカル 5G の敷設状況に関わらないカバレッジの拡大を実現することが可能である。

本実証においては、協調型インフラ基盤によりアグリゲーションされる無線通信に関する情報を通信ルータから取得し、センターサーバに設置する CradioNW 判定機能に送信した。その無線情報に基づいて無線品質を予測し、その結果を車載器内に構築する協調型インフラ基盤上の協調制御 GW に通知することで、アグリゲーションされたマルチ無線通信の中でパケットの最適な振り分け制御を行った。

4) 必要性・緊急性・新規性

【必要性】

実証地域(秋保ルート)のような条件不利地域(トンネル、中山間地)では、単一キャリアで安定した常時モニタリングを実現することが困難なため、複数キャリアの無線エリアを重畳し、自動運転システムの通信接続性を確保した。

【緊急性】

自動運転の早期の社会実装を実現するためには、新規の設備投資を抑える等の経済合理性のある実現方式が必要である。従って、公衆網とローカル 5G を組み合わせることで既存設備を有効活用し、安定した通信の実現を目指した。

【新規性】

公衆網とローカル 5G 網のカバレッジ境界における通信の安定性を確保するため、公衆網とローカル 5G 網を併用する協調型インフラ基盤は新規性と必要性を兼ねた。受信電力を測定位置に紐付けずに機械学習モデルで学習する手法を用いることで、未走行の場所での品質予測精度を向上させる新規技

術も検証した。

5) 検証条件

協調型インフラ基盤および Cradio を MEC 上に実装し、通信リソース最適統合を行う。走行ルート上の複数キャリアネットワークの通信品質を確認し、統合制御のための通信品質予測モデルを構築する。複数キャリアネットワークカバレッジ内において、複数回線統合有無での映像監視途絶率の改善を確認する。

6) 開発・評価項目

表 8 ユースケース②における開発・評価項目(1)

番号	開発・評価項目
(1)	協調型インフラ基盤× Cradio による複数回線の統合システムの開発
(2)	協調型インフラ基盤× Cradio を利用した場合のアップリンクスループットの計測

(1) 協調型インフラ基盤× Cradio による複数回線の統合システムの開発

本テーマでは、中山間地のキャリアネットワークの不感エリア対策として、自営ネットワークであるローカル 5G を導入した。公衆網とローカル 5G 網は、公衆・閉域の違いから、ユーザが使用できる帯域の大きさや時間変動が大きく異なる。このため、両者を併用する場合、特にカバレッジ境界において、適切なバランスでトラフィックを流さないと通信が途切れるリスクがある。そのため、公衆網とローカル 5G 網のネットワーク品質を予測する Cradio を開発した。さらに、Cradio による事前予測だけでなく、現地の車両からの遠隔監視映像をパッシブ計測し、車両位置とネットワーク品質の紐付けから映像伝送時の通信品質を予測する QIM(Quality Index Map)も開発、併用することで、予測値と実測値に基づいた複数回線へのパケット振り分けを協調型インフラ基盤にて実施する。この技術を用いることにより、パケットレベルで複数回線を併用するアグリゲーション方式が可能となり、将来の品質劣化や瞬間的な品質劣化に対応し、広帯域な通信を実現することを目指している。

本システムのプロトコルスタックを表 9 に示す。無線区間で IP 通信を Multipath QUIC の通信に置き換えることで、送受アプリケーションのプロトコルからは透過的に複数の無線回線を統合している。

表 9 協調型インフラ基盤による複数回線統合のプロトコルスタック

送信	無線区間			受信
iSCP ⁶	→			iSCP
WebSocket	→			WebSocket
TLS	→			TLS
TCP	→			TCP
IP	Multipath QUIC			IP
	回線 A	回線 B	ローカル 5G	

(2) 協調型インフラ基盤× Cradio を利用した場合のアップリンクスループットの計測

実証を行う秋保ルートでは、温泉街となる山の麓(秋保里センター)から観光地となる山の中腹部(秋保大滝)までの片道約 15km のルートを走行する。このルートは、カーブや高低差を含む入り組んだ道路となっており、公衆網の電波が十分に到達するエリアと不十分なエリアを含んでしまう。このようなエリアでは、受信電力の強弱で無線の変調方式や符号化率が変化してしまうため、エリアによるスループットの速度差が生じてしまう。この速度差は、使用するモバイルネットワークのエリア設計によって異なり、速度差もモバイルネットワークによって異なる。そこで本検証では、ルート上の各回線のアップリンクスループット、協調型インフラ基盤×Cradio を利用した場合のアップリンクスループットを計測し、ルート全域の特性を明らかにする。計測方法は以下とする。

①位置情報の計測

実際に走らせる自動運転バスには、位置情報を取得する GPS モジュールを搭載しており、常時システム内で位置情報が流通している。本計測では、この情報をロギングすることで計測を実施する。

②アップリンクスループットの計測

今回開発した協調型インフラ基盤には、3回線をアグリゲーションするマルチパス転送ゲートウェイ(以下、MP 転送 GW)という機能があり、複数キャリアネットワークとローカル 5G を経由したトラフィックを統括的に管理している。本計測では、MP 転送 GW を通過するトラフィック量を毎秒、計測することでアップリンクスループットの計測を実施する。本実証では、ドコモ回線、au 回線、ローカル 5G 回線の3回線を検証ターゲットとしているため、3回線を個別に使用した場合と協調型インフラ基盤でアグリゲーションした場合分けの結果を取得する。

③位置情報とスループットの対応付け

①で取得する位置情報と②で取得するスループット情報は、時刻情報も一緒に取得している。個別に取得したデータを突合することで、時刻、位置、スループットの関係性をまとめる。

⁶ 遠隔監視システムの Stream Control Protocol

7) KPI/KGI

表 10 ユースケース②における KPI/KGI(1)

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	複数キャリアネットワークカバレッジ内で自動運転バス運行の高精細な常時映像監視、車両制御が可能であること。
定量評価	(2)	公衆網およびローカル 5G カバレッジ内でのアップリンクスループットが平均 6Mbps 以上得られること。

(1) 複数キャリアネットワークカバレッジ内で自動運転バス運行の高精細な常時映像監視、車両制御が可能であること。【定性評価】

4.1 で述べた通り、良好な自動運転車両の走行を実現するにあたり、安全性の観点から遠隔監視員による適切な判断が求められ、高い通信電力強度に加えて、高品質な通信性能が必要となる。従って、コンソーシアム側で構築したローカル 5G エリアおよびキャリアネットワークの重畳エリアにて、最適無線を予測することにより、検証走行中のバスから遠隔監視員へ届く通信の品質を向上させることで、安定性の高い車両運行(常時映像監視、車両制御)を実現することを目標とした。

(2) 公衆網およびローカル 5G カバレッジ内でのアップリンクスループットが平均 6Mbps 以上得られること。【定量評価】

目標値の選定理由・妥当性については、車載カメラ 1 台あたりのスループット値が 1Mbps(下限値)でなければ良好な映像品質による遠隔監視は実施できないと想定し、加えて、オーバーヘッド等のデータ容量を加味した結果、計 6Mbps を選定した。スループット値については、遠隔監視システムより出力調整を行った。

目標値算出のロジックは以下の通りである。

(目標値算出のロジック)

必要平均スループット=5.5+0.55=6.05Mbps

- 合計(カメラやテキストデータ)=5.0+0.5=5.5Mbps
 - カメラ=1.0Mbps×5 本=5.0Mbps
 - その他(テキスト等)データ=0.5Mbps
- ネットワークオーバーヘッド(データ分の 10%と仮定)=5.5×0.10=0.55Mbps

4.2.2 スライシングによる通信リソース効率化の検証

1) 目的

市街地等の輻輳しやすい環境においては、車両との通信不能によるモニタリング不能、車両制御不能

を避けるため、帯域確保による通信の安定性が必要となる。

本ユースケースでは、RAN 区間における無線リソース分離技術を用いたスライシングにおいて、ユーザー機器(UE)単位での通信安定化による有効な自動運転通信の実現を目指した。

2) 実証内容の詳細

大規模イベント会場等の通信の安定化に懸念がある輻輳環境下において、キャリア 5G スタンドアローン(SA)にスライシングを適用し通信リソースを確保することで、重要度の高い通信の安定性向上を目指した。

安定通信の活用用途としては、遠隔監視装置側から障がい者等の支援が必要な乗客を把握することを想定し、AIにより伝送した車内映像について解析を行い、白杖検知を試みた。

具体的な実施手順は以下の通りである。

まず、スライシング有無の条件下でスループットを計測し、大規模イベント会場等の高輻輳環境下でも自動運転の遠隔監視および車両制御が可能な通信性能であるか確認した。

次に、都市 OS から取得した災害情報や工事情報に基づく車両停止、ルート・車線変更通知の通信成功確率を評価し、高輻輳環境下でも 99%以上の成功率を達成するかを検証した。

最後に、遠隔監視画面における白杖検知の判定結果については、エッジ側処理と比較を行い、遠隔先処理とエッジ側処理の間で検知率に差異がないかを確認した。

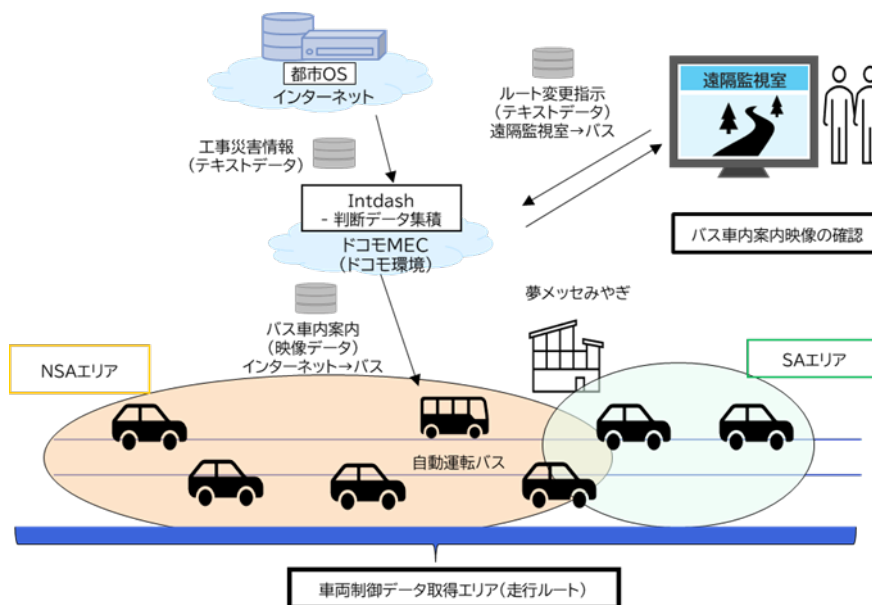


図 10 ユースケース②・東部北ルートにおけるシステム構成

3) 利用技術

レベル4自動運転の実現にあたっては、安定した通信の実現が肝要だと考えられる通信エリアをカバーするため、本実証では以下の通信技術を活用した。当該通信技術を選択した理由についても、以下に示す。

ネットワークのスライシング

レベル4自動運転における通信では、安定したネットワーク帯域の提供が必要要件になることが想定されるが、既存のネットワークでは他ユーザの利用状況に影響され通信のスループットが落ち、自動運転における安定的なモニタリングや車両制御が損なわれる可能性がある。本実証では、ネットワークを仮想的に分離するスライシングの技術を用いて自動運転の通信システムで使用するネットワークリソースを確保し、回線の混雑状況に左右されない安定的な通信を提供するスライシング技術が有効であると考えられるため、採用した。

4) 必要性・緊急性・新規性

【必要性】

常時モニタリングやバス映像を用いた AI 検知によるモニタリングの運用性と経済性を実現するため、スライシングによるネットワークリソースの確保により自動運転システムの通信安定性を確保した。

【緊急性】

新たなインフラ投資をせず既存ネットワークによるスライシングを利用して安定性を高める等、迅速かつ経済的な自動運転ネットワークの社会実装の早期実現を目指した。

【新規性】

これまでのモバイル QoS と異なる、ネットワークリソースを部分的に占有することでさらなる通信安定化を実現するスライシング技術を、市場提供前に自動運転ネットワークへの適応性確認のため用いた。

5) 検証条件

大規模イベント会場等の通信帯域確保が難しい環境下において、キャリア 5G SA(スタンドアローン)にスライシングを適用し、ネットワークリソースを確保することで、緊急性の高い通信の安定性の向上を行う。

6) 開発・評価項目

表 11 ユースケース②における開発・評価項目(2)

番号	開発・評価項目
(1)	常時映像監視と車両制御の精度に対する主観評価
(2)	白杖検知に関する主観評価と課題・改善点の抽出

(3)	スライディング有り無しの場合のスループット測定
(4)	スライディング技術を使用し、輻輳環境でも自動運転車両制御に必要なデータの受信
(5)	白杖検知成功率 90%以上

(1) 常時映像監視と車両制御の精度に対する主観評価

本項の評価にあたっては、遠隔監視映像の視認性および車両制御の精度が、運行者の安全確認および運転判断に対して十分な品質を備えているかを把握するため、遠隔監視員と運転士を対象とした体系的なアンケート調査を実施した。アンケート内容について、遠隔監視映像は解像度、明るさ、コントラスト、視野角、途切れやノイズの発生状況、悪天候・逆光時の視認性等、多様な運行環境を想定した項目で構成し、常時監視に必要な映像品質の担保や情報取得が可能かを主観的に評価することを目的とした。車両制御に関しては、減速タイミング、加減速の滑らかさ、カーブ進入時の挙動、ハンドル操作の自然さ、走行モード切り替えの妥当性、緊急時の挙動の分かりやすさ等を評価項目とし、自動運転固有の動作が運行者にとって理解しやすく、安全性を損なわない水準にあるかを主観的に評価することを目的とした。これらのアンケートは、実際の走行環境下での体験を踏まえた主観評価を収集することで、運行現場における実用性および改善点を明確化することを目的として実施した。

(2) 白杖検知に関する主観評価と課題・改善点の抽出

白杖検知に関する評価と課題抽出においては、歩行者、とりわけ視覚障害者の安全確保に対する自動運転システムの有効性を検証するため、運転士・遠隔監視員等の関係者を対象とした主観評価アンケートを実施した。本アンケートは、白杖使用者の検知精度が実運行において十分であったか、検知後の車両挙動が安全性・予測可能性の観点から適切であったかを把握することを目的としたものである。

設問内容は、カメラによる白杖検知の「見落としの有無」「誤検知の有無」「検知タイミングの妥当性」といった認識性能に関する項目に加え、検知時の車両の減速挙動や停止判断の自然さ、遠隔監視画面における警告表示の分かりやすさ等、運転士・監視者が実際に安全確保のために必要とする情報の取得可否を確認する内容で構成した。また、白杖利用者への配慮として適切と感じた点や、実際の混雑環境・逆光環境での見え方等、環境条件の変化を踏まえた自由記述も収集した。さらに、白杖検知が自動運転バスの社会的受容性に与える影響を測定するため、安全性への信頼度、今後の運用に向けた改善要望、都市 OS 等の外部データ連携との相乗効果に対する認識も調査した。

これらの回答をもとに、認識精度の課題やユーザインターフェースの改善点、運用上の留意事項を体系的に整理し、今後の技術改良および実装計画の検討に資する知見を抽出した。

(3) スライシング有り無しの場合のスループット測定

大規模イベント会場等でのスライシングの有効性を確認するため、イベント期間中のような輻輳環境においても自動運転の遠隔監視と車両制御が可能な通信性能を達成することを確認した。本実証における目指す通信性能は、下りスループット 20Mbps とした。

測定の手法は、評価対象の端末を3台用意し、それぞれをスライシングあり、5G ワイドあり、オプション無し(以下、ノーマル)とし、輻輳環境を模擬するために 5G ワイドありの端末(以下、トラヒック負荷端末)を別途6台用意し、計9台の構成とした。

スループットの測定には、オープンソースソフトウェアでネットワークパフォーマンスの測定ツールである Iperf を使用する。

Iperf は、クライアントとサーバの機能があり、両端間のデータストリームを作成して一方向または双方向のスループットを測定できる。

本検証では、移動端末から測定用サーバに対してデータ通信を行い、測定中は対象エリアを歩行してスループットを測定する。データストリームには UDP を使用する。転送レートについては、評価対象端末は目標通信速度である 20Mbps とし、トラヒック負荷端末は 300Mbps として目標を達成できるかを確認した。

(4) スライシング技術を使用し、輻輳環境でも自動運転車両制御に必要なデータの受信

本検証における開発・評価項目は、スライシング適用時における通信の信頼性を定量的に評価し、自動運転バスの車両制御に関わるデータが高輻輳環境下においても安定して受信可能であることを確認する点に置いた。

評価指標として「受信率」を定義し、サーバから自動運転バス向けに送信したデータの送信回数と、バス側で正常に受信できた回数を基に算出した。受信率は以下の考え方に基づき評価を行った。

- ・サーバ側で送信した総データ数を送信回数とする
- ・バス側で正常に受信・確認できたデータ数を受信回数とする
- ・受信率は「 $\text{受信回数} \div \text{送信回数} \times 100(\%)$ 」として算出する

本評価では、車両制御に関わる通信の信頼性確保を目的とし、受信率 99%以上を達成できているかを評価基準とした。

また、スライシングの有効性を明確にするため、以下の3つの通信条件において同一の評価指標を用いた比較評価を実施した。

- ・スライシング適用 SIM
- ・5G ワイド適用 SIM
- ・標準(ノーマル)SIM

各条件において、自動運転バスを同一エリア・同一走行ルートで走行させ、高輻輳環境下における受信率を測定・比較することで、スライシング適用時の通信品質および信頼性向上効果を評価した。

(5) 白杖検知成功率 90%以上

以下 2 点をもとに当目標値を設定した。

- ・令和 6 年度地域デジタル基盤活用推進事業(自動運転レベル4検証タイプ)の結果
- ・レベル4自動運転の実装を想定し、白杖所持者が安全に利用できる環境を構築するには、白杖所持者を高精度に検知することが不可欠であること

7) KPI/KGI

表 12 ユースケース②における KPI/KGI(2)

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	自動運転バス車内入口のカメラによる白杖検知により、白杖所持者の乗降時および乗車中の安全確保に寄与すること。
定量評価	(2)	イベント期間中のような高い輻輳環境でも、スライシングの活用により、自動運転の車両制御に関わるデータが 99%受信できること。
	(3)	エッジ側処理に対し、1Mbps 以上での伝送レートを確保した状況下で、遠隔処理による白杖検知成功率が 90%以上であること。

(1) 自動運転バス車内入口のカメラによる白杖検知により、白杖所持者の乗降時および乗車中の安全確保に寄与すること。【定性評価】

白杖所持者が自動運転バスを安全に利用するためには、白杖検知技術の精度向上および実運用時の信頼性検証が必要になると想定する。そのため、本実証を通じて、白杖所持者の乗降時および乗車中の安全確保の自動化に向けた示唆の収集を目的とし、設定した。

(2) イベント期間中のような高い輻輳環境でも、スライシングの活用により、自動運転の車両制御に関わるデータが 99%受信できること。【定量評価】

本検証では、「イベント期間中のような高い輻輳環境下においても、スライシングの活用により自動運転バスの車両制御に関わるデータが 99%受信可能であること」を確認することを目的とした。スライシング技術を使用し、輻輳環境でも自動運転車両制御に必要なデータが受信できることを示すため、当目標値を設定した。

まず、スライシングを適用するエリアを事前に設定し、対象エリアにおける SA 方式 5G 基地局の各種パラメータ調整を実施した。これにより、スライシング通信が有効となる無線環境を構築した。



図 11 東部北ルートにおけるスライシングを適用するエリア(地理院地図:<https://maps.gsi.go.jp/>)

次に、自動運転バスに検証用端末を搭載し、あらかじめ設定したエリア内を実際に走行させることで、走行中の通信状況および車両制御に関わるデータの受信状況を測定した。

さらに、イベント開催時等を想定した高輻輳環境を再現するため、複数台の 5G ワイド端末を用意し、同一無線エリア内で同時通信を行うことで無線リソースに意図的に負荷を与えた。

加えて、比較評価を行うため、スライシング適用端末に加え、5G ワイド端末および標準(ノーマル) SIM を用意し、同一条件下において同様の走行・測定を実施した。これにより、輻輳環境下における通信品質およびデータ受信率の差異を比較・評価した。

(3) エッジ側処理に対し、1Mbps 以上での伝送レートを確保した状況下で、遠隔処理による白杖検知成功率が 90%以上であること。【定量評価】

白杖検知処理を高精度で行うには、AI を活用した画像解析技術が必要である。また、複数現場の映像を遠隔側で一元的に処理する効率的な運用においては、遠隔地に送った映像での検知精度が現地処理した場合と比べて大きく乖離しないことを確認する必要がある。

無線ネットワークを通じた遠隔値への映像伝送は、映像の圧縮やネットワーク遅延、フレーム欠損等、現地処理では発生しない要因によって精度が低下する可能性があるため、遠隔側の白杖検知精度がエッジ側と比較して大きく劣化しない水準として、少なくとも 90%以上を確保することを目標とする。

この基準を満たすことで、サポートを必要とする白杖所持者を遠隔地から把握し、必要なアクションを取ることが可能となる。

4.3 ③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証

当該ユースケースは実施していない。

4.4 ④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送：周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装

4.4.1 路面の凍結/積雪状況に応じた車両制御の実装、路面凍結センサデータの遠隔監視装置へのリアルタイム転送および路面状態の表示と走行モードへのアシスト

1) 目的

現在のレベル4自動運転の社会実装においては、都市 OS をはじめとする外部データや周辺環境情報が、車両制御へ十分に利活用されていない点が課題となっている。本ユースケースでは、こうした課題の解消を目的として都市 OS と自動運転システムを接続し、外部データおよび周辺環境情報を車両の制御に活用する仕組みの有効性を検証する。併せて、将来的なスマートシティの実現に向け、車両から取得した情報を都市 OS へ連携することで、他のユースケースにおけるデータ活用の可能性の検討にも資するものとする。

本ユースケースにおける秋保ルートの走行にあたっては、「路面凍結状況に応じた車両制御」に取り組む。環境センサを用いて路面状態をセンシングし、積雪凍結路の危険箇所を事前に判定して可視化することで、安全な自動運転走行の実現を目指す。なお、本実証で取得した路面状況に係る情報については、都市 OS へアップロードする。

2) 実証内容の詳細

仙台市の地域特性である冬季の気温低下を踏まえ、路面凍結時における自動運転バスの安全な走行の実現に取り組む。本ユースケースでは、環境センサを装備した車両が積雪・凍結路を走行し、サンプル周期 1.0 秒以内で路面状態のセンシングを行う。取得したデータに基づき、路面状態を「乾燥路」、「湿路」、「湿潤路」、「シャーベット」、「積雪路」、「凍結路」の6区分で判定し、監視員によるモニタリング結果と照合することで、判定精度が 95%以上確保されているか確認する。また、定性的な路面状態の判定に加え、滑り摩擦係数(0~1.0)およびラフネス(表面粗さ、凹凸)を定量的に測定することにより、積雪・凍結時における自動運転バスの走行モードの切り換えの有効性を検証する。

具体的な実証手順および概念図を図 12 に示す。

まず、自動運転バスの走行に先立ち、環境センサを取り付けたレンタカーにて事前走行を行い、路面凍結情報の検知および収集を行う。事前走行時には、自動運転バスの運転士がレンタカーに同乗し、路面状態の目視確認を行うことで、当日の運行可否の判断やチェーン装着の要否、路面凍結検知情報との差分の有無、ならびに走行速度の調整の必要性について総合的に判断する。

レンタカーの走行により取得した路面凍結情報は都市 OS へアップロードし、都市 OS 上で整理・蓄積された路面凍結情報を取得することで、当該情報を遠隔監視画面に表示する。これにより、遠隔監視員等が走行ルートにおける路面の凍結状況を把握することを可能とする。自動運転バスの走行中は、遠隔監視員が都市 OS から取得した路面凍結情報を基に状況判断を行う。走行モード切り替えにあたっては、遠隔監視員から車内オペレータを通じて運転士へ情報連携を行い、車内オペレータが走行モードの切り換えを行う。この際、自動運転バスは、一時停車を行ったうえで、当該路面凍結情報および実際

の路面状態等を踏まえ、走行モードを適宜切り替える。これにより、走行が困難となる路面凍結路においても安全な運行を可能とする。

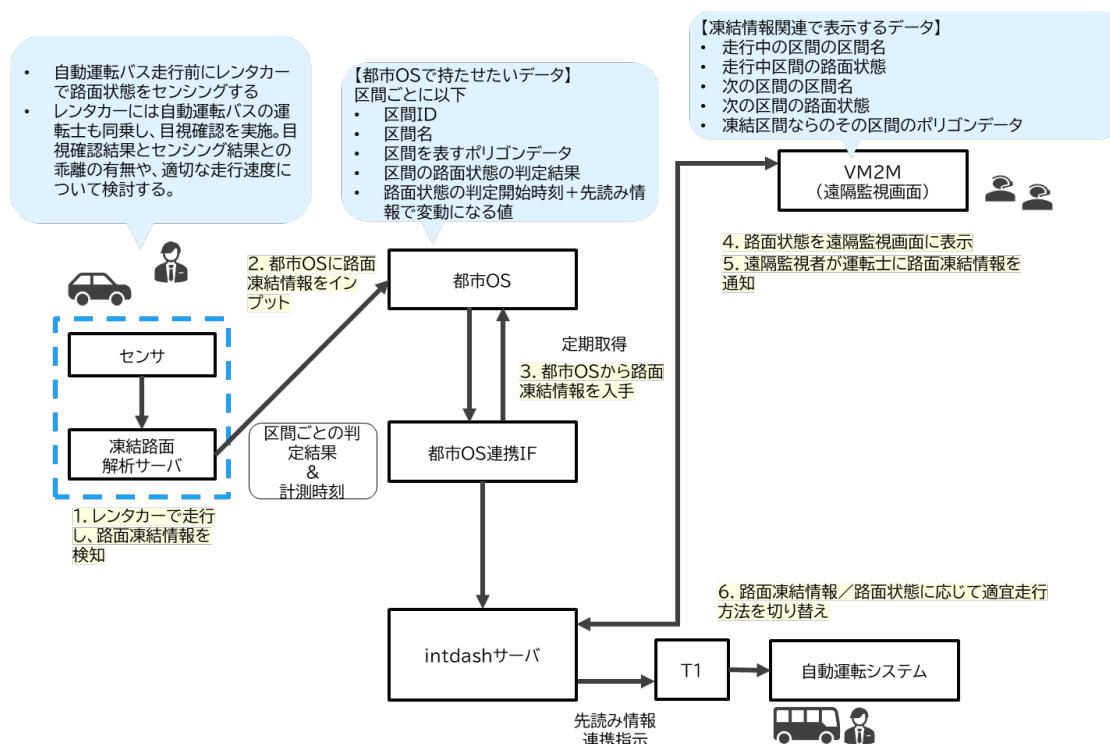


図 12 ユースケース④・秋保ルートにおけるシステム構成

3) 利用技術

本実証では、カメラおよび湿度センサから取得したデータを用いて路面凍結状況を解析するアプリケーションを車両に搭載することで、車両走行中における路面状態の把握を可能とする。また、環境センサから取得されるデータについては、本事業で導入するV2N通信システムを用いてリアルタイムにサンプリングおよび判定を行い、遠隔監視装置へ転送することで、路面凍結状況の可視化を図る。さらに、車両上で解析された路面凍結状況に関する情報はMECへ送信し、都市OS上に構築された「路面凍結状況データベース」へ伝送・蓄積する。加えて、自動運転車両の走行中には、MEC上のシステムを介して都市OSから路面凍結情報を取得し、当該情報を自動運転車両へ伝送することで、路面状況に応じた自動運転をアシストするシステムを開発する。

4) 必要性・緊急性・新規性

本実証は、積雪寒冷地である仙台市において、レベル4自動運転の社会実装を進めるうえで顕在化している「気象・路面条件に起因する運行リスク」および「それに対応するための外部環境情報の利活用の未成熟」という課題に対し、通信基盤、都市OS、遠隔監視および車両制御を一体的に検証するものである。その必要性・緊急性・新規性は、以下の点にある。

【必要性】

仙台市の秋保エリアでは、冬季における積雪や路面凍結の発生頻度が高く、自動運転車両の安全走行に大きな影響を及ぼす。特にレベル4自動運転の実現においては、運転士による即時介入が前提とならないため、車両が走行する環境条件を事前かつリアルタイムに把握し、走行可否や走行モードの判断に反映させる仕組みが不可欠である。

一方、従来の自動運転実証では、路面状況や気象条件に関する情報は、車両搭載センサや運行管理者の経験的判断に依存するケースが多く、都市 OS 等の外部データ基盤と連携した形で、環境情報を体系的に活用する検証は十分とは言えなかった。そのため、積雪寒冷地における自動運転の安全性を確保し、将来的な社会実装に耐えうる運行形態を確立する観点から、本実証において環境情報を活用した制御判断の有効性を検証することが必要不可欠である。

【緊急性】

近年、バス運転士不足や労働時間規制の強化(いわゆる 2024 年問題)を背景に、仙台市を含む地方都市において公共交通の持続可能性が大きな課題となっている。特に観光地や中山間地では、積雪や路面凍結による運休・減便が地域住民および来訪者の移動に直接的な影響を及ぼしており、安定した交通手段の確保が喫緊の課題である。

自動運転バスの社会実装を進めるためには、単に自動走行を実現するだけでなく、冬季の厳しい環境条件下においても安全性を確保しつつ、柔軟に運行判断や走行制御を行える運用手法を早期に確立する必要がある。本実証は、積雪・凍結といった実運用上の制約条件を前提とした制御判断の有効性を検証するものであり、社会実装を見据えた実践的検証として高い緊急性を有する。

【新規性】

従来の自動運転実証においても、路面状況や気象条件に関するデータ取得や可視化の取り組みは行われてきた。一方で、これらの環境情報を都市 OS 等の外部データ基盤と連携させ、自動運転車両の走行可否判断や走行モード切り替えといった制御判断に直接活用することを主目的として、体系的に検証した事例は限定的である。

本実証では、路面凍結センサ等による実測データを都市 OS 外部データ基盤とリアルタイムに連携させ、その情報を遠隔監視装置に集約し、自動運転車両の制御判断に反映する点に特徴がある。情報の取得・表示に留まらず、制御判断への活用までを一連のプロセスとして検証することで、積雪寒冷地におけるレベル4自動運転の実装に向けた実践的な知見の獲得を目指す。

また、都市 OS を介したデータ連携を前提とすることで、将来的には自動運転車両に限らず、除雪車両や他の公共交通、さらには道路管理や防災分野へのデータ展開も見据えた拡張性を有している点も特徴であり、都市全体でのデータ利活用を見据えた自動運転制御の高度化という観点で新規性を有する。

5) 検証条件

本実証における検証条件は、積雪寒冷地におけるレベル4自動運転の社会実装を見据え、実運用に近い環境下での検証が可能となるよう、以下の条件を不変条件として設定した。

まず、地理的条件として、本実証の実施地域は、冬季において積雪および路面凍結が発生することが想定される地域であることを前提とした。秋保エリアは過年度の気象実績から冬季の気温低下や降雪、路面凍結が確認されており、自動運転車両の走行安全性に影響を与える環境条件を有している。これにより、路面凍結時を想定した走行モード切り替え判断の検証が可能な環境として設定した。

次に、時間的条件として、検証は主として冬季期間に実施し、日中および時間帯による気温変化を含めた環境条件下で評価を行った。特定の時間帯や気象条件に限定せず、実運用を想定した幅を持たせた条件設定とすることで、路面状況の変化に対する情報連携および制御判断の有効性を確認することを目的とした。

通信・システム条件としては、路面凍結センサ等により取得された環境情報が、都市 OS 外部データ基盤を介して遠隔監視装置に提供される構成を前提条件とした。本実証の走行ルート上には通信不感地帯や通信品質が不安定となる区間が含まれていることから、環境情報の取得・伝送・表示については、通信状況の変動を含む実環境下において成立するかを検証条件に含めた。

また、運用条件として、本実証では安全性確保の観点から、環境情報に運行判断は遠隔監視員が実施する運用とした。一方で、走行モード切り替えについては車内オペレータが実施する運用とし、遠隔監視と車内オペレーションが連携する形での判断・対応プロセスを検証条件に含めた。自動運転車両による自律的なルート変更や完全自動化は検証条件に含めていない。

以上の条件のもと、路面凍結情報を都市 OS と連携させ、通信状況の変動を含む実運用環境下において走行モード切り替え判断に活用する一連のプロセスが成立するかを、本実証における検証条件として設定した。

6) 開発・評価項目

表 13 ユースケース④における開発・評価項目(1)

番号	開発・評価項目
(1)	都市 OS から受信した凍結情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価
(2)	路面凍結状況に応じた走行モード切り替えの妥当性評価
(3)	凍結情報を前提とした一連の運行判断プロセスの実運用適合性評価
(4)	凍結センシングのサンプリング周期に関する評価
(5)	路面状態判定精度および凍結情報受信率に関する評価

(1) 都市 OS から受信した凍結情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価

都市 OS から受信した凍結情報が、遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映されることを確認するとともに、当該情報を用いて遠隔監視員が運行状況を適切に把握できるかを評価した。

併せて、凍結情報の表示方法や操作性、ユーザインターフェースについて、実運用を想定した場合に問題がないかを評価対象とした。どちらも遠隔監視員に対するアンケート・インタビューにて実施した。

(2) 路面凍結状況に応じた走行モード切り替えの妥当性評価

自動運転の走行が難しい路面凍結路においても自動運転が可能となるよう、路面状況判断システムによる判定結果に基づき、走行モード(通常モード・凍結モード)の切り替えが妥当であるか、運転士を対象としたアンケートにより評価した。

(3) 凍結情報を前提とした一連の運行判断プロセスの実運用適合性評価

都市 OS から受信した凍結情報を基に、遠隔監視員が運行可否や対応方針を判断し、必要に応じて車両側で対応を行う一連の運行判断プロセスについて、実運用を想定した条件下で成立するかを評価した。

(4) 凍結センシングのサンプリング周期に関する評価

凍結路面情報をリアルタイムに検知し、車両制御(走行モード切り替え・減速等)の即時性を確保するため、凍結センシングのサンプリング周期が 1.0 秒以内であるかを評価した。また、各種センサデータが所定の周期で取得・処理されていることを確認対象とした。

(5) 路面状態判定精度および凍結情報受信率に関する評価

路面凍結を含む路面状態について、6種類の路面状態判定精度が 95%以上得られるかを評価するとともに、凍結情報データが遠隔監視装置側で 92%以上の受信率を確保できているかを評価した。また、凍結路面における走行安全性の確保に資する十分な判定精度および通信品質が確保されていることを確認対象とした。

7) KPI/KGI

表 14 ユースケース④における KPI/KGI(1)

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	(1)	凍結路面をリアルタイムに検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の即時性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結センシングのサンプリングが 1.0 秒以内となるか確認する。
	(2)	凍結路面を正確に検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の妥当性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、6種類の路面状態判定精度が 95%得られることを確認する。
	(3)	車両制御(モード切り替え・減速)の即時性・妥当性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結情報データをエリアカバー率と同等に 92%受信できるか確認する。(自動運転車両側の受信率)

定性評価	(4)	遠隔監視員による運行状況の判断や対応の正確性・効率性を高めるため、都市 OS から受信した凍結情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映されることを確認するとともに、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを検証する。
------	-----	--

- (1) 凍結路面をリアルタイムに検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の即時性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結センシングのサンプリングが 1.0 秒以内となるか確認する。【定量評価】

① 目標値の意味・設定理由

本 KPI は、凍結路面の発生・変化を遅滞なく検知し、車両制御(走行モード切り替え・減速判断等)に即時反映できるかを確認することを目的として設定したものである。凍結の発生・解消は短時間で変化する可能性があり、サンプリング間隔が長い場合、検知遅延による安全性低下のリスクが生じる。

このため、本実証では、凍結センシングデータのサンプリング間隔を 1.0 秒以内 とすることを目標値として設定し、冬季環境下における即時性の確保が可能かを検証対象とした。

② 測定・確認方法

実証期間中に取得した凍結センシングデータのログを用い、センサデータの取得時刻からサンプリング間隔を算出する。取得されたデータについて、サンプリング間隔が 1.0 秒以内であることを確認することで、目標値に対する達成状況を評価する。

- (2) 凍結路面を正確に検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の妥当性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、6種類の路面状態判定精度が 95%得られることを確認する。【定量評価】

① 目標値の意味・設定理由

本 KPI は、凍結・非凍結を含む複数の路面状態を正確に判定し、その結果を車両制御判断(走行モード切り替え・減速)に適切に活用できるかを確認することを目的として設定したものである。路面状態の誤判定は、不必要な減速や安全性を損なう走行に繋がる可能性があるため、高い判定精度が求められる。このため、本実証では 6 種類の路面状態判定において 95%以上の精度を目標値として設定し、実運用レベルでの妥当性を確認することとした。

② 測定・確認方法

実証期間中に取得した路面状態判定結果について、現地観測結果、既知の路面状態情報との突合を行い、正解率を算出する。判定結果に対する正解判定の割合を算出し、95%以上の精度が得られているかを確認する。

- (3) 車両制御(モード切り替え・減速)の即時性・妥当性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結情報データをエリアカバー率と同等に 92%受信できるか確認する。(自動運転車両側の受信率)【定量評価】

① 目標値の意味・設定理由

本 KPI は、都市 OS を介して連携された凍結情報データが、自動運転バスへ確実に伝送され、走行モード切り替え判断に活用可能であることを確認するために設定したものである。走行ルート上には通信不感地帯や通信品質が不安定となる区間が存在することから、100%の到達率を前提とせず、4.1.17)で示した本実証におけるエリアカバー率の KPI と同等として 92% を目標値とした。

② 測定・確認方法

受信率は、図 13 に示すデータパイプラインと車両内の車載器との間で測定した。測定は、走行ルート全域で路面凍結と判定されたと仮定した条件下で実施した。路面凍結データを1秒間隔で発信し、車両側で受信した件数を記録する。発信数と受信数から受信率を算出した。

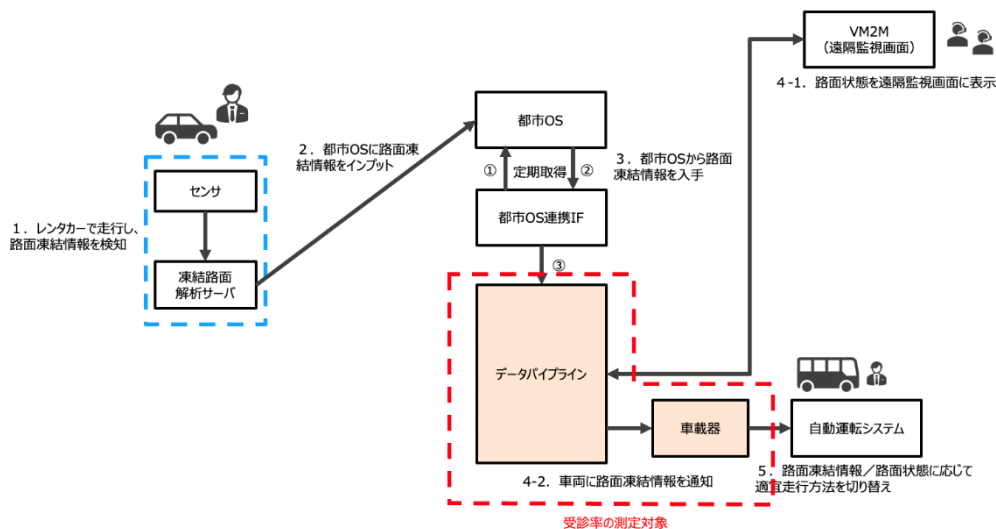


図 13 都市 OS 連携システム構成(凍結情報)

- (4) 遠隔監視員による運行状況の判断や対応の正確性・効率性を高めるため、都市 OS から受信した凍結情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映されることを確認するとともに、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを検証する。【定性評価】

① 目標値の意味・設定理由

本 KPI は、遠隔監視員が凍結情報を正確かつ迅速に把握し、適切な判断・対応を行えることを目的として設定したものである。都市 OS から受信した凍結情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映され、操作性やユーザインターフェースに支障がないことを確認する。

本項目は定量的な数値評価が難しいため、定性評価として設定し、実証を通じて運用上の課題や改善点を抽出することを目的としている。

② 測定・確認方法

実証期間中の遠隔監視業務における運用記録および関係者ヒアリングを基に、ダッシュボードの表示内容や操作性について定性的に評価した。

4.4.2 災害情報、道路工事状況に応じた車両制御の実装

1) 目的

先述の通り、自動運転の社会実装においては、都市 OS をはじめとする外部データや周辺環境情報が、車両制御へ十分に利活用されていない点が課題として挙げられる。

本ユースケースにおける東部北ルートの走行にあたっては、「災害情報や道路工事状況に応じた制御」に取り組む。都市 OS と連携し、災害情報や道路工事状況をリアルタイムに把握することで、状況に応じた効率的な車両制御が可能となり、交通渋滞の緩和や緊急時における迅速な対応を可能とすることを目的とする。

2) 実証内容の詳細

本ユースケースでは、災害情報や道路工事状況をリアルタイムに把握し、当該情報に応じた適切な車両制御を行うことで、自動運転バスの効率的かつ安全な走行の実現を目指す。なお、今回実施する車両制御の内容について、災害情報を受信した場合には、安全が確保された場所へ移動したうえで車両を停止させる。一方、工事情報を受信した場合には、第二車線への車線変更および工事区間通過後の第一車線への復帰を行う。

具体的な実証手順および概念図を以下に示す。

災害情報の場合、まず都市 OS に災害情報のデータをアップロードする。自動運転バスの走行中に都市 OS から災害情報を取得すると、遠隔監視員へアラートを発出し、遠隔監視員は当該情報に基づき状況判断を行う。その後、遠隔監視員から運転士へ災害情報を通知し、運転士は災害時ルートへ切り替えを行う。ルート切り替えにあたっては、周辺の道路状況を確認するとともに必要な走行指示を行い、避難場所として設定した仙台うみの杜水族館へ向けて自動走行を行う。目的地到着後は、安全が確保された場所に車両を停止させ、遠隔監視員が周辺の道路状況および安全性を確認したうえで、アナウンスにより乗客の避難誘導を実施する。

工事情報についても、災害情報の場合と同様に、まず都市 OS へ工事情報のデータをアップロードする。都市 OS からは工事情報を定期的に取り得し、走行ルート上に工事区間が存在することを確認した場合には、遠隔監視員および運転士へ通知を行う。通知を受けた遠隔監視員は、当該情報に基づき状況を判断し、運転士はその判断を踏まえて工事区間を回避する走行ルートへ切り替えを行う。

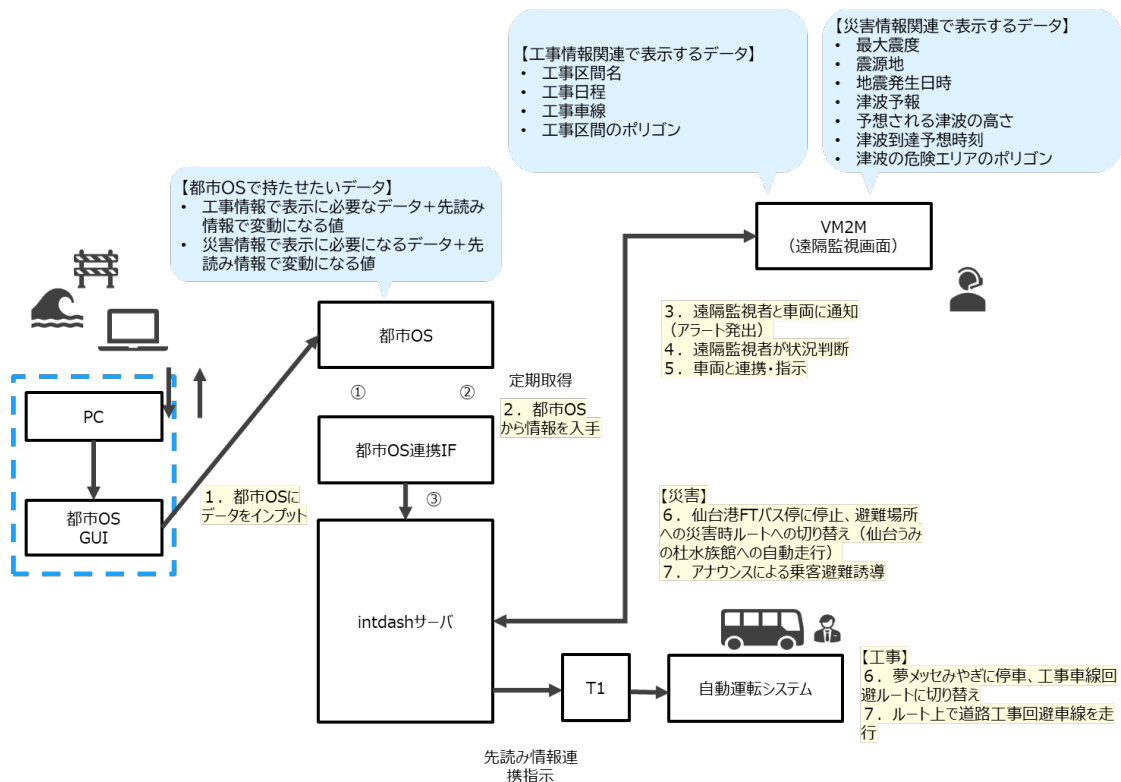


図 14 ユースケース④東部北ルートにおけるシステム構成

3) 利用技術

本ユースケースでは、都市 OS と連携し、工事情報および災害情報を MEC 上に構築したアプリケーションにて取得し、当該情報の分析を行う。分析結果に基づき、状況に応じた車両制御を実施することで、自動運転バスの安全かつ円滑な運行を支援する。具体的には、災害情報を検知した場合、自動運転車両に対して避難場所への走行を指示する。一方、工事情報を検知した場合は、自動運転車両に対して工事区間を回避するための車線変更を行う。

4) 必要性・緊急性・新規性

本実証は、仙台市東部北エリアにおいて想定される災害発生時や道路工事発生時の交通環境変化に対し、自動運転車両が安全かつ柔軟に対応するために必要となる外部情報の取得・連携・活用の有効性を検証するものである。その必要性・緊急性・新規性は以下の点にある。

【必要性】

仙台市東部北エリアは、沿岸部に近い地理的特性を有しており、台風や豪雨等による浸水、地震発生時の被害、復旧・復興に伴う道路工事等、交通環境が突発的かつ頻繁に変化する可能性がある地域である。このような環境下においては、事前に設定された走行ルートや静的な地図情報のみでは、自動運転車両の安全な運行を維持することが困難となる。

レベル4自動運転の実装においては、災害発生や道路工事といった外部要因により走行環境が変化した場合でも、最新の交通規制情報や工事情報を把握し、走行可否判断やルート変更等の判断を行うことが不可欠である。そのため、自治体が保有する災害情報や道路工事情報を都市 OS 等の外部データ基盤を介して取得し、自動運転の運行判断に活用する仕組みの有効性を検証することは、実運用を

見据えたうえで必要不可欠である。

【緊急性】

近年、自然災害の頻発・激甚化により、災害発生時の迅速な交通確保や復旧対応が社会的な課題となっている。特に、災害時や復旧工事期間中においても、地域住民や関係者の移動手段を確保することは重要であり、自動運転技術の活用が期待されている。

一方で、災害情報と工事情報が自動運転システムに適切に連携されない場合、不要な運休や危険な走行に繋がる恐れがある。こうしたリスクを回避するためには、災害情報や道路工事情報を迅速かつ確実に取得し、遠隔監視を通じて運行判断(運行可否判断、ルート変更判断等)に反映させる運用を早期に確立する必要がある。本実証ではダミーの工事情報や災害情報を用いて検証を行うが、検証環境は実運用を想定の上構築しており、社会実装を見据えた観点から高い緊急性を有する。

【新規性】

従来の自動運転実証において、災害や道路工事に関する情報は事後的に考慮する、もしくは運行管理者の経験に依存して考慮するケースが多く、自治体が保有する災害情報や工事情報を都市 OS 等のデータ基盤を介して体系的に連携し、自動運転の運行判断に活用する取り組みは限定的であった。

本実証の新規性は、仙台市が保有する災害情報および道路工事情報を都市 OS 外部データ基盤と連携させ、遠隔監視装置において当該情報を確認したうえで自動運転車両の運行判断に活用する点にある。単なる情報提示に留まらず、災害情報や工事情報を運行可否判断やルート判断の根拠情報として位置づけ、実運用を想定した形で検証を行っている。

また、災害時や工事期間中といった非定常な交通環境を前提に、自動運転の運行判断プロセスを検証することで、平常時のみならず非常時にも適用可能な自動運転運用モデルの構築に資する点も、本実証の新規性である。

5) 検証条件

本実証における検証条件は、仙台市東部北ルートにおいて想定される災害発生時および道路工事発生時の交通環境変化に対して自動運転車両の運行判断が適切に行えるかを検証するため、実運用を想定して設定した。

まず、対象エリアの条件として、本実証は仙台市東部北エリアを対象とし、災害発生や復旧・維持管理に伴う道路工事が発生し得る地域特性を前提とした。当該エリアは、沿岸部に近い地理的条件を有しており、自然災害時や工事実施時に交通規制や走行環境の変化が生じる可能性があることから、災害情報や工事情報を活用した運行判断の検証に適した環境である。

次に、実証環境の構築条件として、本実証では、仙台市都市 OS 外部データ基盤に対して、災害情報および道路工事情報を模したダミーデータを投入することで検証を実施した。実際の災害発生情報や工事情報を用いるのではなく、想定される情報内容や発生タイミングを設定したダミーデータを用いることで、災害情報と工事情報が都市 OS を介して提供される状況を再現し、情報連携および運行判断プロセスの成立性を検証条件とした。

また、システム条件として、都市 OS 外部データ基盤を通じて提供される災害情報と工事情報が、遠隔監視装置において確認可能であることを不変条件とした。これにより、遠隔監視員が当該情報を把握したうえで、運行可否判断や対応判断を行う運用プロセスを検証できる条件を設定した。

さらに、運用条件として、本実証では安全性確保の観点から、災害情報と工事情報に基づく運行判断

は遠隔監視員が実施する運用とした。一方で、実際のルート変更操作については車内オペレータが実施する運用とし、遠隔監視と車内オペレーションが連携する形での判断・対応プロセスを検証条件に含めた。自動運転車両による自律的なルート変更や完全自動化は検証条件に含めていない。

以上の条件のもと、災害情報と工事情報を都市 OS と連携させ、ダミーデータによって再現された非定常な交通環境を前提として、遠隔監視および車内オペレータが連携して自動運転車両の運行判断・対応を行う一連のプロセスが、東部北エリアの実運用を想定した条件下で成立するかを、本実証における検証条件として設定した。

6) 開発・評価項目

表 15 ユースケース④における開発・評価項目(2)

番号	開発・評価項目
(1)	都市 OS から受信した情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価
(2)	災害情報に基づく車両制御(ルート変更)の妥当性評価
(3)	工事区間における走行時の安全性向上に関する評価
(4)	工事・災害情報データの受信精度および車両制御への反映に関する評価

(1) 都市 OS から受信した災害情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価

都市 OS から受信した災害情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映され、遠隔監視員が災害発生状況を正確かつ迅速に把握できるかを評価した。併せて、当該情報を用いた運行状況の判断および対応を行ううえで、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを評価対象とした。

(2) 災害情報に基づく車両制御(ルート変更)の妥当性評価

都市 OS から受信した災害情報に基づき、自動運転バスにおいてルート変更等の車両制御が適切に行われるかを評価した。特に、災害発生時における車両制御が乗客の安全確保に資するものであるか、実運用を想定した判断・対応として妥当であるかを確認対象とした。

(3) 工事区間における走行時の安全性向上に関する評価

道路工事区間においても、自動運転バスが安全かつ適切な挙動(車線変更等)を行うことで、走行時の安全性向上に寄与するかを評価した。工事区間における回避判断および対応が、実運用を想定した条件下で成立するかを確認対象とした。

(4) 工事・災害情報データの受信精度および車両制御への反映に関する評価

都市 OS から受信した災害情報および工事情報データについて、自動運転車両側で 99%以上の精度で受信できているかを評価するとともに、当該情報が車両停止、ルート変更、車線変更等の適切な車両制御に反映されているかを評価した。災害発生時および工事区間走行時においても、安定した情報伝達および即時的な車両制御が可能であることを確認対象とした。

7) KPI/KGI

表 16 ユースケース④における KPI/KGI(2)

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	(1)	災害情報通知に基づく車両の停止、ルート変更通知が自動運転車両で 99%受信できる。
	(2)	工事情報データに基づく車両の停止、ルート/車線変更通知が自動運転車両で 99%受信できる。
定性評価	(3)	遠隔監視装置のダッシュボードに災害情報を追加し、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを確認する。
	(4)	災害発生時における乗客の安全性確保のため、都市 OS から受信した災害情報に基づく車両制御(ルート変更)が適切に行われるか。また避難時における乗客の安全性に関する評価をアンケートにて確認する。
	(5)	工事区間に対して、自動運転バスが安全かつ適切な挙動(車線変更)をとることで、走行における安全性の向上に寄与するか確認する。

(1) 災害情報通知が自動運転車両で 99%受信できること【定量評価】

① 目標値の意味・設定理由

効率的かつ安全な自動運転車両制御を実行するため、災害等の有事情報を自動運転車両へ正確に伝送する必要がある。このため、「自動運転車両で 99%受信」を目標として設定した。本実証では、実証構成ネットワークを活用し、都市 OS から取得した災害情報を車両内システムへ連携することで、災害情報の受信率を測定した。

② 測定・確認方法

受信率は、図 15 に示すデータパイプラインと車両内の車載器との間で測定した。測定は、エリア内(図 16)で災害発生を仮定した条件下で実施した。通知を即時に行うため、災害情報データを1秒間隔で発信し、車両側で受信した件数を記録した。発信数と受信数から受信率を算出した。

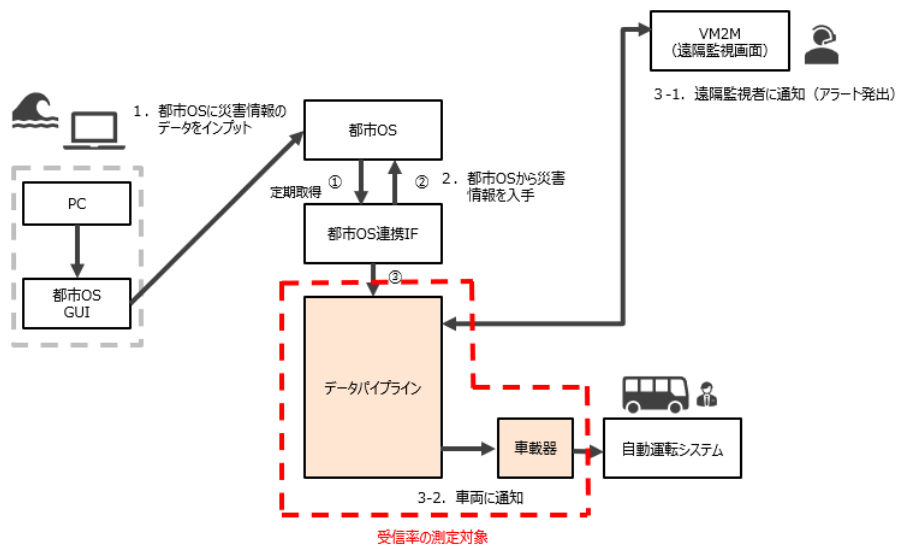


図 15 都市 OS 連携システム構成(災害情報)



図 16 災害情報受信率測定エリア(地理院地図:<https://maps.gsi.go.jp/>)

(2) 工事情報通知が自動運転車両で 99%受信できること【定量評価】

① 目標値の意味・設定理由

効率的かつ安全な自動運転車両制御を実行するには、工事等の道路状況に関する情報を自動運転車両へ正確に伝送する必要がある。このため、「自動運転車両で 99%受信」を目標として設定した。本検証では、実証構成ネットワークを活用し、都市 OS から取得した工事情報を車両内システムへ連携することで、工事情報の受信率を測定した。

② 測定・確認方法

受信率は、図 17 に示すデータパイプラインと車両内の車載器との間で測定した。測定は、工事実施を仮定したエリア内(図 18)で実施した。通知を即時に行うため、工事情報データを1秒間隔で発信し、車両側で受信した件数を記録した。発信数と受信数から受信率を算出した。

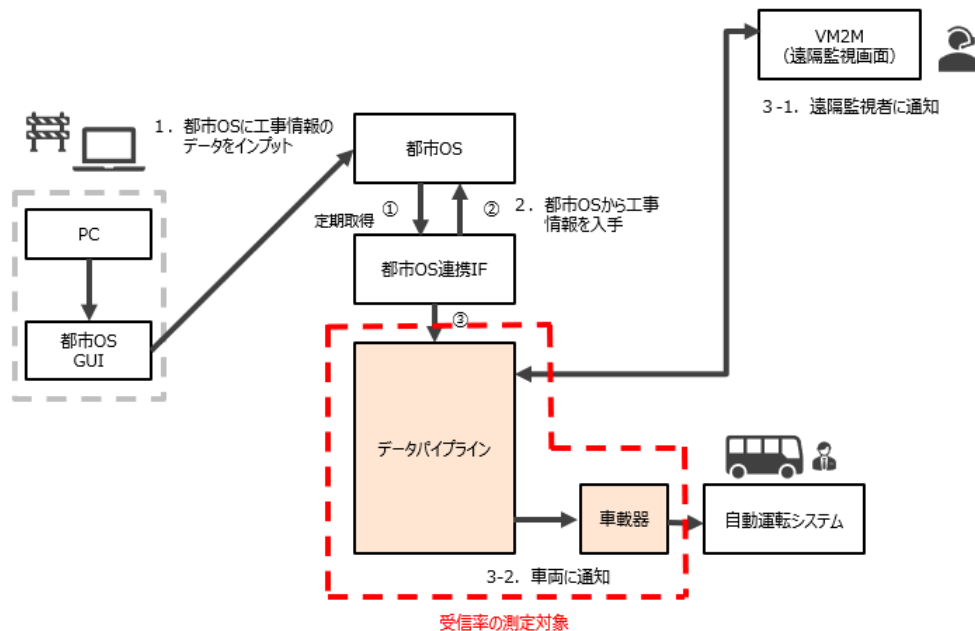


図 17 都市 OS 連携システム構成(工事情報)



図 18 工事情報受信率測定エリア(地理院地図:<https://maps.gsi.go.jp/>)

- (3) 遠隔監視員による運行状況の判断や対応の正確性・効率性を高めるため、都市 OS から受信した災害情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映されることを確認するとともに、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを検証する。【定性評価】

本評価項目は、災害発生時や道路工事発生時において、遠隔監視員が自動運転バスの運行状況を正確かつ迅速に把握し、適切な判断・対応を行うために必要となる情報提示環境の有効性を確認することを目的として設定した。

都市 OS から受信した災害情報と工事情報が、遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映され、遠隔監視員が当該情報を運行判断の前提情報として活用可能であることを確認するとともに、画面構成や表示内容、操作性、ユーザインターフェースについて、運用上支障がないかを検証した。

- (4) 災害発生時における乗客の安全性確保のため、都市 OS から受信した災害情報に基づく車両制御(ルート変更)が適切に行われ、避難時における乗客の安全性(避難場所到着後の誘導等)に関する評価をヒアリングにて確認する。【定性評価】

本評価項目は、災害発生時において、都市 OS から受信した災害情報を基に、自動運転バスが安全な運行判断を行い、乗客の安全性確保に資する対応が可能であることを確認することを目的として設定した。

災害発生時には、危険エリアの回避や安全性を考慮したルート変更等が求められることから、災害情報を踏まえた車両制御(ルート変更)が適切に行われることが重要となる。それを踏まえ、災害情報に基づく運行判断および対応が成立するかについて、関係者ヒアリングを通じて評価を行った。

なお、都市 OS から受信した災害情報を活用した車両制御について、従来の無線等による情報通知フローと比較し、情報の正確性および受信の迅速性の観点で改善が見込まれる点について確認することも目的とした。

(5) 工事区間に対して、自動運転バスが安全かつ適切な挙動(車線変更)をとることで、走行における安全性の向上に寄与するか確認する。【定性評価】

本評価項目は、道路工事の実施により走行環境が変化した場合においても、自動運転バスが安全かつ適切な挙動(車線変更等)をとり、走行時の安全性向上に寄与できるかを確認することを目的として設定した。

工事区間においては、車線規制や通行帯の変更等が発生する可能性があり、通常時とは異なる走行判断が求められる。それを踏まえ、工事情報を基にした運行判断および対応が適切に行われるかを確認し、工事区間における安全な走行が可能であるかを検証した。

これにより、工事区間における接触や追突等の事故リスクを未然に防ぐ観点から、自動運転バスの走行安全性の確保に資するかを確認することを目的とした。

4.5 ⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証

当該ユースケースは実施していない。

4.6 レベル4の社会実装に向けた検討

4.6.1 運用検証

1) システムの操作性やユーザインターフェースに関する評価(特に遠隔監視員の軽減負担等)

本実証では、協調型自動運転システムと外部連携データを活用することによる運用性の向上と負担軽減効果を目指し、システムの操作性やユーザインターフェースに関する評価を行った。

■秋保ルートにおける運用負担の軽減効果測定

秋保ルートでは、路面凍結検知結果を MEC 上で処理したうえで協調型インフラ基盤を通じて自動運転バスと遠隔監視装置へ通知を行い、路面凍結情報に基づいた車両の走行制御を実施した。

調律走行期間および本番走行期間を検証期間とし、運転士および遠隔監視員を対象に、インタビューによる定性評価を実施した。

主な定性評価項目は以下の通りである。

- システムから通知された路面凍結検知結果と実際の運転時に認識された路面状況の差分、およびシステムによる路面凍結情報の事前把握によるモニタリング負担の軽減
- 自動運転バスから遠隔映像監視装置に配信された映像、および路面凍結情報と MEC 上から自動運転バスに路面凍結情報を配信した際の通信劣化状況も踏まえた有用性
- 通信条件不利地での通信劣化状況における、MEC 上からの車両映像伝送と路面凍結情報の許容度合い

■東部北ルートにおける運用負担の軽減効果測定

東部北ルートでは、工事情報および緊急災害情報を都市 OS 等の外部データ基盤から MEC 経由で自動運転車両と遠隔監視装置へ配信、および走行ルート切り替えを実施した。

調律走行期間および本番走行期間を検証期間とし、運転士および遠隔監視員を対象に、インタビューによる定性評価を実施した。

主な定性評価項目は以下の通りである。

- 工事情報のシステム連携に基づく、走行車線変更時の「システムから通知された車線変更の結果」と「実際の運転時の車線変更状況」の差分比較、およびシステムによる工事情報の事前把握による監視員の負担軽減
- 災害情報のシステム連携に基づく、自動運転バスが退避場所へ移動・停止時する際の「システムから通知された車両の避難行動の結果」と「実際の運転時の車両・乗客避難行動」および遠隔監視員の負担軽減
- 自動運転バスから遠隔監視室に配信された映像、および MEC 上から「道路の車線工事情報、災害発生情報」を配信した際の通信状況(周辺イベント実施・混雑時)観点での情報伝送の確実性、映像の乱れ、遅延、視認の容易性等の有用性

2) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

本実証では、通信不感エリアを含む通信環境の確保を前提として路面凍結時の走行モード制御や災害情報と工事情報の把握による走行ルート制御を行い、走行エリアの拡大や柔軟な走行による自動運転率向上の観点から、地域交通の持続性への寄与を目指した。

- 走行エリアの拡大

都市 OS から取得した路面情報に応じて車両の走行パターン(速度の調節等)を制御することで、従来は自動走行が困難であった凍結路面等を含む区画についても、自動走行可能エリアとして拡大を可能とする。また、通信不感エリアを解消することで、当該エリアにおいても情報通信を可能とすることで走行エリアとして拡大を可能とする。

測定・検証方法としては、ログ分析を行った。路面状況の取得によって、拡大された走行エリアを確認する。

- 柔軟な走行による自動運転率向上

道路工事による走行ルートへの影響や災害発生時の緊急退避等に対して、外部から取得した情報を基に走行ルートの制御を行うことで、自動運転率の向上を目指した。

測定・検証方法としては、ログ分析を行った。道路工事・災害発生時それぞれについて自動運転システムのログを解析し、外部情報を取得した場合の自動運転率を計測した。

3) データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策

本実証では、運用面においてローカル 5G 現地設置機器の管理機能を活用することで、異常検知およびバックホール回線断線時のアラーム発報に基づいた迅速な保守対応を可能とした。ファイアウォール(以下、FW)のアクセスログを定期的に確認し、通信状況に応じた適切な対応を行うことで、障害発生時の早期検知および復旧を支援する運用体制の実現を目指した。

検証するにあたり、MEC の機能である MEC ダイレクトを活用し、電話番号認証による接続制限を行い不正な外部接続を防止することで、安全性の高いネットワーク環境を構築し、必要な情報をセキュアに伝送できる体制を確保した。また、ローカル 5G 経由で取得したデータについては、SIM 認証により管理された UE からのみアクセス可能なクラウド環境を設定し、クラウド上の FW によるアクセス制御を実施した。さらに、インターネット上に構築されたデータ連携基盤との通信についても、MEC 上の FW によるアクセス制御を行い、通信経路全体のセキュリティを担保した。

検証期間中は日次で通信ログを確認し、不審な通信や不正アクセスのログの確認を行い、必要に応じて翌日の実証開始前に対策を講じることで、実証期間中の安定的かつ安全なネットワーク運用を検証した。

4) 通信システム(路車協調システムや端末を含む)の維持管理・保守

本実証では、維持管理性および保守性の向上の観点から、自動運転バスの走行中において通信システムに障害が発生した場合を想定し、事象発生箇所の切り分けによる通信ログの可視化およびアラート報知の有効性確保を目指した。

運用期間中は、各ネットワークにおいて通信ログの取得および障害発生時のアラート出力を実装し、

日次で通信ログを追跡し、障害発生の有無および当該兆候の確認を行った。確認結果に基づき、翌日の実証開始前に必要な対策を施すことで、障害の発生を抑制し、安定したネットワーク運用の確保を図った。

4.6.2 効果検証

1) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化

本実証では、レベル4自動運転の社会実装を目指し、協調型自動運転システムと外部連携データを活用した運行制御および情報連携の仕組みを構築し、手動介入回数の低減を目指した。秋保ルートおよび東部北ルートの実証におけるシステム構成は以下の通りである。

- 秋保ルートにおいては、路面凍結検知結果を MEC で処理し、協調型インフラ基盤を介して自動運転車両および遠隔監視装置へ配信する仕組みを構築した。
- 東部北ルートにおいては、都市 OS 等の外部データ基盤から工事情報や災害情報を受信し、MEC を通じて自動運転車両および遠隔監視室へ配信し、走行ルートを制御する構成とした。

従来、災害発生や道路状況変化といった複雑に変動する交通環境下において、自動運転車両搭載のセンサでは知覚・検出が困難なため手動介入を行っていたが、上記の実証構成により、手動介入回数の低減が可能となるか検証した。具体的には、自動運転車両と自動運転管制システム間のデータ連携を行う MQTT Broker により通信ログを記録し、運行状況および自動走行モードを集計する構成を採用した。これにより、自動走行達成率(運行時間に対する自動運転状態の割合)を定量的に算出した。

2) 自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

レベル4自動運転の社会実装では、協調型自動運転システムと外部連携データによる危険回避行動等の自動運転支援機能の高度化・重要性がより高まると考えられることから、秋保ルートおよび東部北ルートの実証におけるそれぞれの寄与は以下の観点である。

- 秋保ルートにおける凍結/積雪検知結果の MEC から自動運転車両への配信および外部データ連携基盤との連携は、将来的に同地区を走行する多数の自動運転車両への横展開が可能であると考えられる。このように、路面状況を自動運転車両へ送信することで、複雑な自然環境下においても安全・円滑な自動運転の実装に寄与することを目指した。
- 東部北ルートにおける都市 OS 等の外部データ基盤と連携した工事情報や緊急災害情報の配信および自動運転車両の制御等、複雑に変動する交通環境と自然環境の把握が必要なロケーションへの適用について、自動運転車両に搭載したセンサのみでは十分な情報が把握できないという課題がある。協調型自動運転の高度化の実現は、遠隔監視室から車両の周辺状況をより正確に把握することに繋がると考え、レベル4自動運転の社会実装に向けた協調性機能の向上を目指した。

各実証エリアの課題解決に向けて、凍結/積雪検知結果の自動運転車両への配信・制御、ならびに都市 OS と連携した災害情報と工事情報の自動運転車両への配信・制御をそれぞれ過度な遅延なく行うことができ、遠隔監視装置経由で自動運転レベル2の運転士との円滑な連携が可能であるかを、KPI/KGI に基づき評価を行った。

3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

本実証においてもレベル4自動運転の社会実装を見据え、路面凍結/積雪情報を MEC から遠隔監視装置と自動運転バスに連携するとともに、基礎自治体や省庁が保持する都市 OS 相当の公的情報として車線工事情報や緊急災害情報を遠隔操作室および自動運転バスに配信・制御する実証を行った。本実証では、これらの実証要素を通じて自動運転の走行ルートにおける柔軟化・時間短縮・交通利便性について、以下の向上効果を目指した。

- 運行効率化

レンタカーに搭載したセンシングデバイスから「路面凍結/積雪検出機器」情報を MEC 上の路面凍結/積雪検出結果データベースに集約し、都市 OS や遠隔監視装置および自動運転車両へ配信する構成とした。これにより、路面凍結/積雪状態下での自動運転車両の運行モード変更を可能とし、車両走行不可となる状況の防止を図った。

また、自治体の都市 OS と外部データ連携することにより取得した車線工事情報と、路面凍結/積雪情報を組み合わせ、路面状況に応じた協調型自動運転を実施することで運行の効率化および最適化を目指した。

- 時間短縮

路面凍結/積雪情報ならびに自治体の都市 OS から外部データ連携された車線工事情報を遠隔監視装置およびレベル4自動運転車両へ配信することで、凍結/積雪区間の運行効率化および工事区間の予測・車線変更を可能とした。これにより渋滞となり得る状況を事前に認識し、車線変更を行うことで渋滞可能性時間の短縮および最適化を目指した。

また、自治体の都市 OS から連携された災害情報(地震・津波の情報を想定)を遠隔監視室およびレベル4自動運転バスへ配信し、安全かつ適切な位置での停車および乗客避難を想定した検討を実施した。これにより、今後発生する可能性のある緊急災害発生時における乗客の避難時間確保および適切な行動について定性的な検討を行った。

- 利便性向上

上述したレベル4自動運転バスの車両走行不可の防止、路面凍結/積雪情報や工事情報を活用した予測的な車線変更等、外部データとの情報連携を考慮した協調型自動運転の実現を目指し、安全に運行効率化および時間短縮を図った。これは、自動運転バスの定刻運行ダイヤグラムにも繋がり、自動運転バスの社会実装時においても、周辺住民および路線利用者の満足度と利便性の向上に繋がると考える。

4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

ユースケース①、②の実証においては、マルチセルラーを RAN アグリゲーションすることで RAN インフラのシェアリングを実現し、自動運转向け設備としての新たな追加投資を行うことなく、無線カバレッジの拡張を図った。なお、将来的な持続的発展性の観点としては、アグリゲーション可能なセルラー RAN の増加とコア設備のシェアリングによる通信のオフローディングを通じて、自動運转向けの設備投資を行うことなく、頑健性の高い通信インフラの実現を見据えている。

UC④の実証においては、周辺環境情報の自動運転車両制御への活用にあたって、都市 OS に路面

の凍結・積雪状況や災害情報と工事情報が収集されていることが求められている。この点について、気象庁が提供する気象データや国土交通省が提供する工事情報データを利用することで、リアルタイムかつ効率的に周辺環境情報を取得することが可能となる。また、これらのオープンデータを積極的に活用することで、都市 OS データ収集に係る運用コストの低減を目指すとともに、将来的には他の自治体や地域と共同利用することで、コストを分担することも可能であると考ええる。

また、車載センサシステムの初期コストの大部分を占める近赤外線レーザーセンサおよび露点・路面温度センサについて、本センサシステムは自動運転車両に限らず、強力なマグネットにより着脱可能な構造を有していることから、タクシー、一般乗合バス、自治体公用車等にも容易に装着し、共用することが可能である。これにより、広域かつ時空間的に多様な道路状態の測定が可能となり、複数主体による共同利用を通じて、大幅なコスト削減が可能であると考ええる。

5. 通信システムに関する構築

5.1 通信システムの全体像

自動運転車両の車内外の状況を明瞭な映像・音声により常時監視することがレベル4自動運転の社会実装における必須要件(道路交通法第 75 条の 20①、同施行規則9条の 29)となっている。

車両搭載カメラの映像と車両制御情報について、離れた場所にある遠隔監視室において常時明瞭な映像による監視と車両制御を可能とするため、本実証で用いる通信システムでは、以下に示す複数の無線通信手段を組み合わせた。移動端末(自動運転バス)は、通信環境に応じて、高品質な通信接続が可能な手段を選択した。

表 17 通信システム一覧

無線通信手段	概要
キャリア通信	走行コース上をカバーするキャリア通信。
ローカル 5G	走行ルート上の通信キャリアの不感エリアを補完するローカル 5G 通信。
スライシング	ネットワークを仮想的に分割(スライシング)し幅広いニーズに対応する技術。本実証においては帯域確保を行う。
Cradio	電波環境の変化に応じ、プロアクティブなハンドオーバーやリソース制御による安定した無線通信を実現するための無線品質予測技術。
協調型インフラ基盤	ネットワーク品質の予測に基づき、複数の異種ネットワーク(キャリア通信、ローカル 5G 等)をパケット単位で動的に最適振分(アグリゲーション)を行う。
MEC (Multi-access Edge Computing)	車両で利用するデバイスにできるだけ近いネットワークにサーバを配置し、独自ネットワーク内で通信を行うことで、通信のセキュリティ性向上を図る。

詳細なシステム構成図やネットワーク構成図については、第 8 章に記載している。

5.2 システム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項等

本実証では、ローカル 5G のバックホール回線に Starlink を採用した。理由は以下に示す。

1. 固定回線の懸念点

地域交通が求められる場所が「離島」「山間部の観光地」といった特殊な地域も想定されるが、以下の課題があると議論が上がった。

- (1)光回線や専用線の引き込みが困難または高コスト
- (2)短期間の構築においては工事期間・費用が現実的でない
- (3)固定回線が前提とするアクセス回線を確保できない可能性

2. 解決案:衛星通信の活用

上記課題を解消するため、バックホール回線を Starlink 等の衛星通信に切り替える案を検討した。衛星バックホールの特徴は以下の通りである。

- (1)地理的制約を受けない:離島や山間部でもアンテナ設置のみで利用可能
- (2)短期利用に適応:光回線工事不要で、イベントや実証に合わせ迅速に導入可能
- (3)災害時の強靱性:地上回線途絶時も独立した通信路として機能

3. 期待効果

バックホール回線を衛星通信に切り替えることで、下記のような効果が期待できる。

- (1)物理的制約の克服:固定回線ではカバーできない地域でも構築可能
- (2)柔軟な通信環境:短期間での構築に対応
- (3)社会的インパクト:離島や山間部の観光地における自動運転の普及可能性を提示
- (4)災害対策の検証:固定回線途絶環境での有効性を実証

6. 実証結果・考察

6.1 ①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保

6.1.1 協調型インフラ基盤× Cradio による複数キャリアネットワークの通信リソース統合の最適化検証

1) 実証スケジュール

表 18 実証スケジュール

ルート	フェーズ	2025年			2026年	
		5月～10月	11月	12月	1月	2月
秋保	準備	要件検討、システム・KPI 設計、申請		開発、実装、試験	調律走行	
	実証				本番走行	
	評価				データとりまとめ	

2) 開発・評価項目の結果

表 19 ユースケース①の開発・評価項目

番号	開発・評価項目
(1)	複数キャリアネットワークとローカル 5G を協調型インフラ基盤×Cradio により組み合わせたシステムの開発
(2)	位置情報と複数キャリア・ローカル 5G の受信電力の計測
(3)	複数キャリアネットワークとローカル 5G の重畳エリアにおける常時映像監視・車両制御の実施可否の計測

(1) 複数キャリアネットワークとローカル 5G を協調型インフラ基盤×Cradio により組み合わせたシステムの開発

本テーマでは、中山間地のキャリアネットワークの不感エリア対策として、協調型インフラ基盤×Cradio により組み合わせたシステムの開発を行った。本節で検証する項目は、(2)位置情報と複数

キャリア、ローカル 5G の受信電力の計測としてまとめているため、本項ではシステム開発で実施した位置情報と電力取得の結果について述べる。

図 19 に、協調型インフラ基盤を通して取得した位置情報(緯度経度)をマッピングした結果を示す。

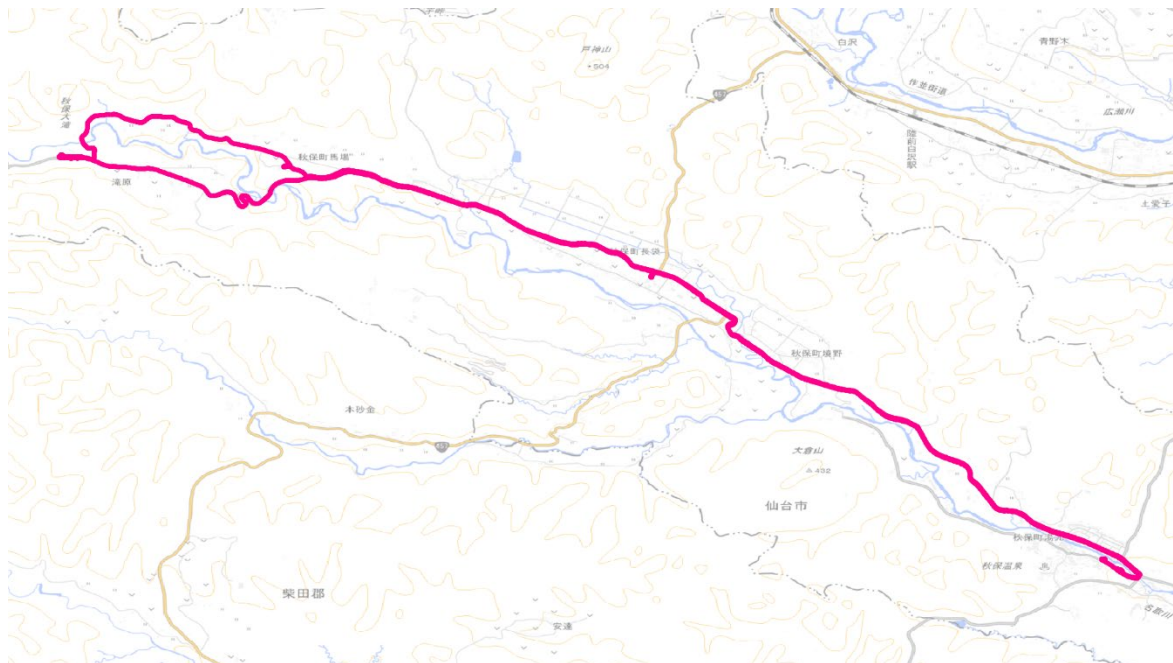


図 19 協調型インフラ基盤を通して取得した位置情報(緯度経度)をマッピングした結果

図 19 に示した結果により、本実証で走行しているルートと一致していることを確認した。

次に、ローカル 5G が設置されている秋保大滝周辺で実施した各回線の受信電力結果を図 16 に示す。

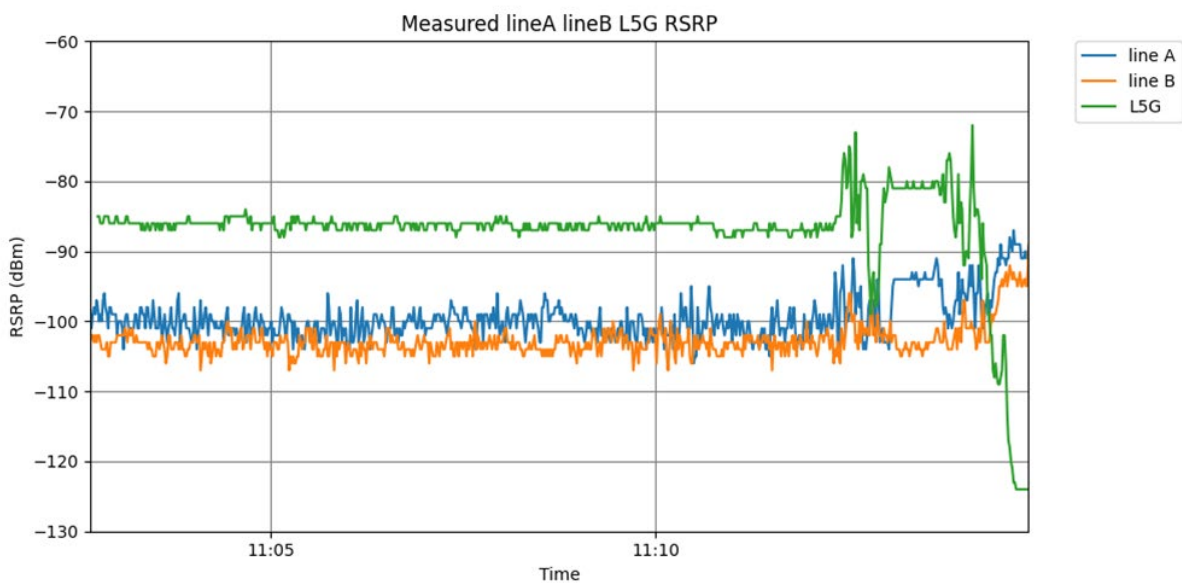


図 20 秋保大滝周辺で実施した各回線の受信電力結果

図 20 に示した結果により、ドコモ回線、au 回線、ローカル 5G 回線の各受信電力を取得できていることを確認した。

(2) 位置情報と複数キャリア・ローカル 5G の受信電力の計測

本テーマでは、中山間地のキャリアネットワークの不感エリア対策として、自営ネットワークであるローカル 5G を導入した。本項では、各キャリアネットワークの状況と併せて、協調型インフラ基盤の導入によって実現した不感エリアの軽減効果について述べる。

① キャリア単回線ごとの状況について

公衆網 A と公衆網 B について、それぞれ単体で利用した場合について述べる。

図 21 に公衆網 A および公衆網 B の受信電力の累積確率分布を示す。赤色の点線はローカル 5G またはキャリア回線の最低受信感度となる -126 dBm を示しており、本結果から公衆網 A および公衆網 B は利用技術適用以前に目標を達成している。

目標の設定に際し、携帯端末にてエリアの事前測定を実施した。その際の結果から、最低受信感度が課題になると予想された。本実証では、高利得な車載用屋外アンテナを自動運転バスの屋根に搭載することで、アンテナ高および利得を改善し受信電力が向上されるよう設計しているため、技術適用前から目標達成したと考えられる。

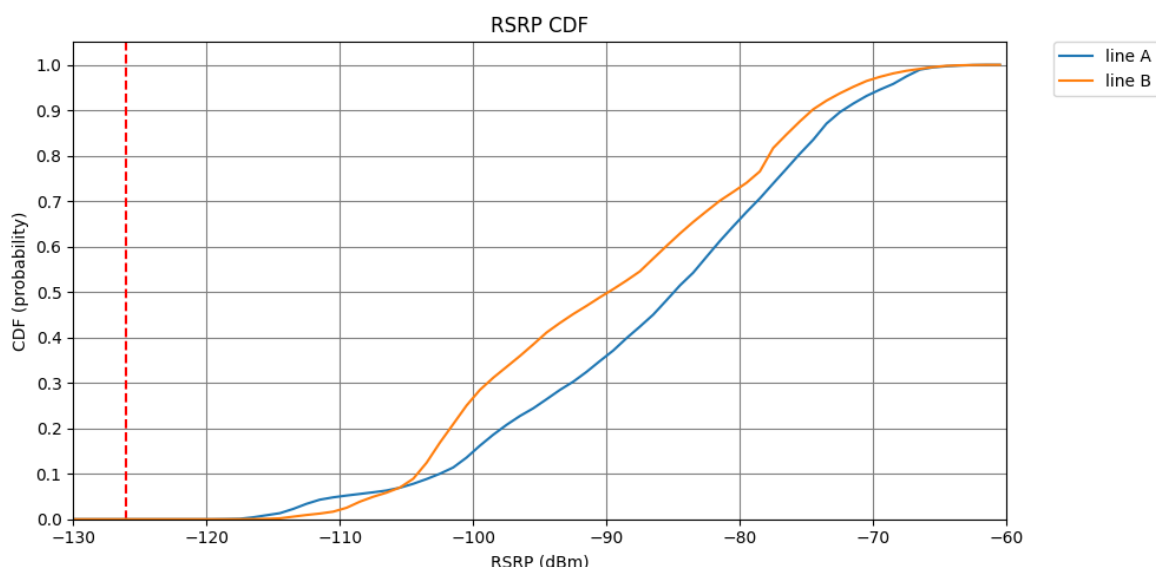


図 21 公衆網 A と公衆網 B のエリアカバレッジ CDF(閾値 -126 dBm)

表 20 各回線のエリアカバレッジ (最小、最大、平均、標準偏差)

	最小(dBm)	最大(dBm)	平均(dBm)	標準偏差(dBm)
公衆網 A	-119	-59	-86.6	12.0
公衆網 B	-118	-59	-89.8	11.8

技術適用有無による相対的な改善効果について評価するため、走行ルート上における公衆網 A および公衆網 B の受信電力 10%ile 値を閾値としたエリアカバー率について、追加の評価を実施した。

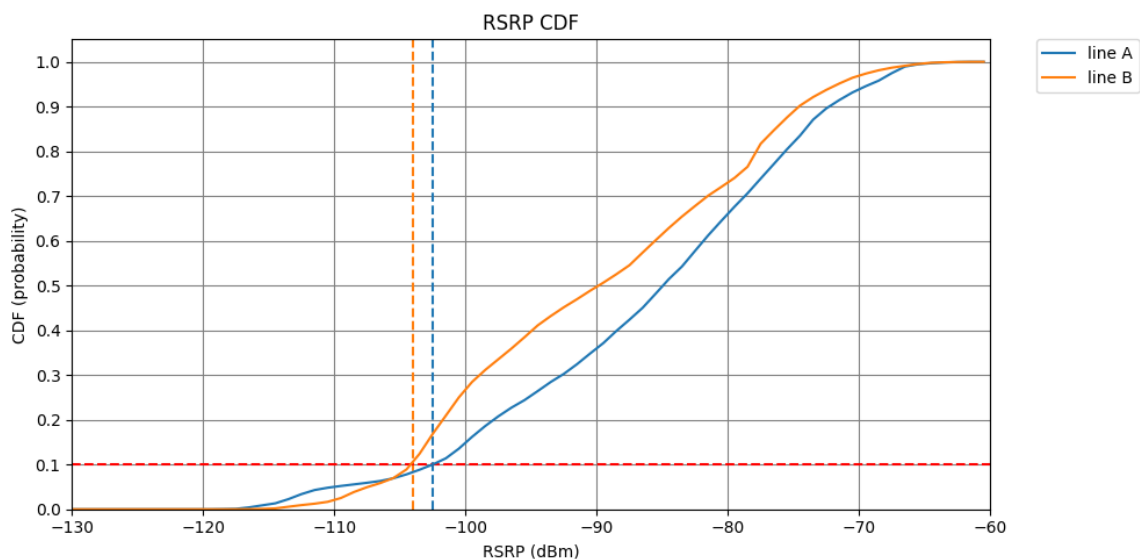


図 22 公衆網 A 公衆網 B の 10%ile 値 CDF

表 21 公衆網 A 公衆網 B の 10%ile 値

	公衆網 A	公衆網 B
10%ile 値	-103 dBm	-104 dBm

②公衆網 A の状況

まず、公衆網 A の状況について、

図 23～図 25 に各周回における公衆網 A の受信電力ヒートマップを示す。エリア全体での平均受信電力は-86.6dBmとなっている。図中の赤丸の箇所は、受信電力の低い箇所を示している。当該箇所については周辺が木々で囲われており、基地局との見通しが無いため電力が低くなったと考えられる。図 26～図 27 に当該エリアの例を示す。

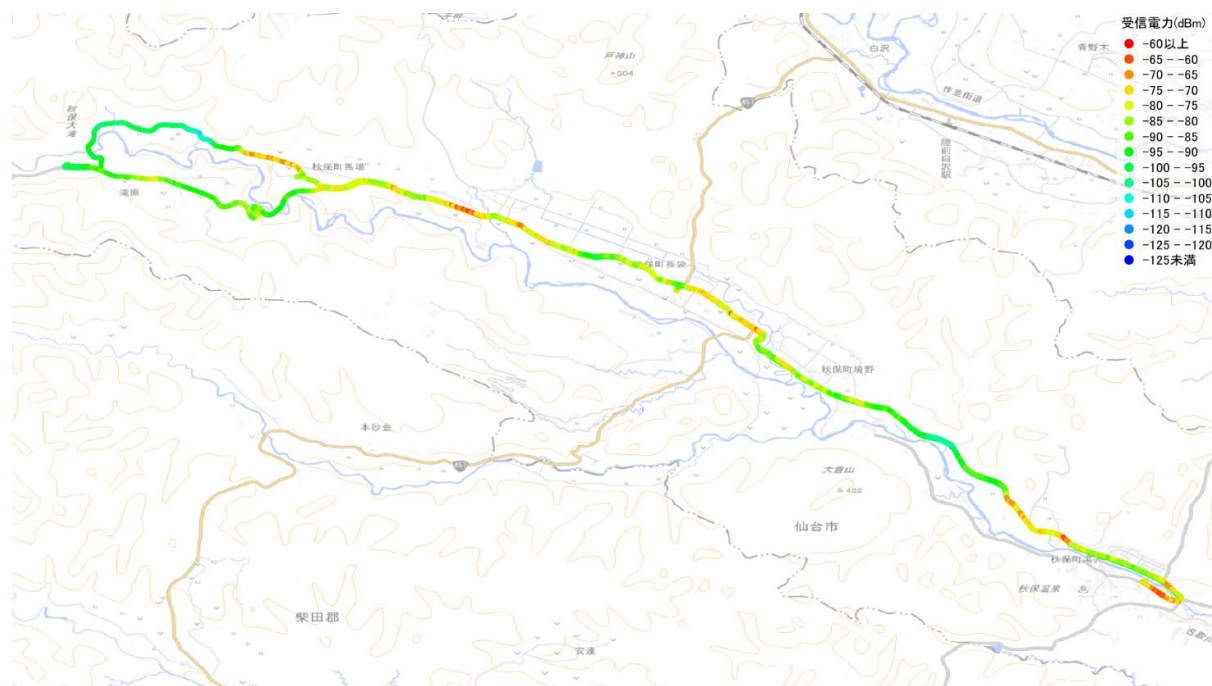


図 23 公衆網 A のエリアカバレッジ ヒートマップ①

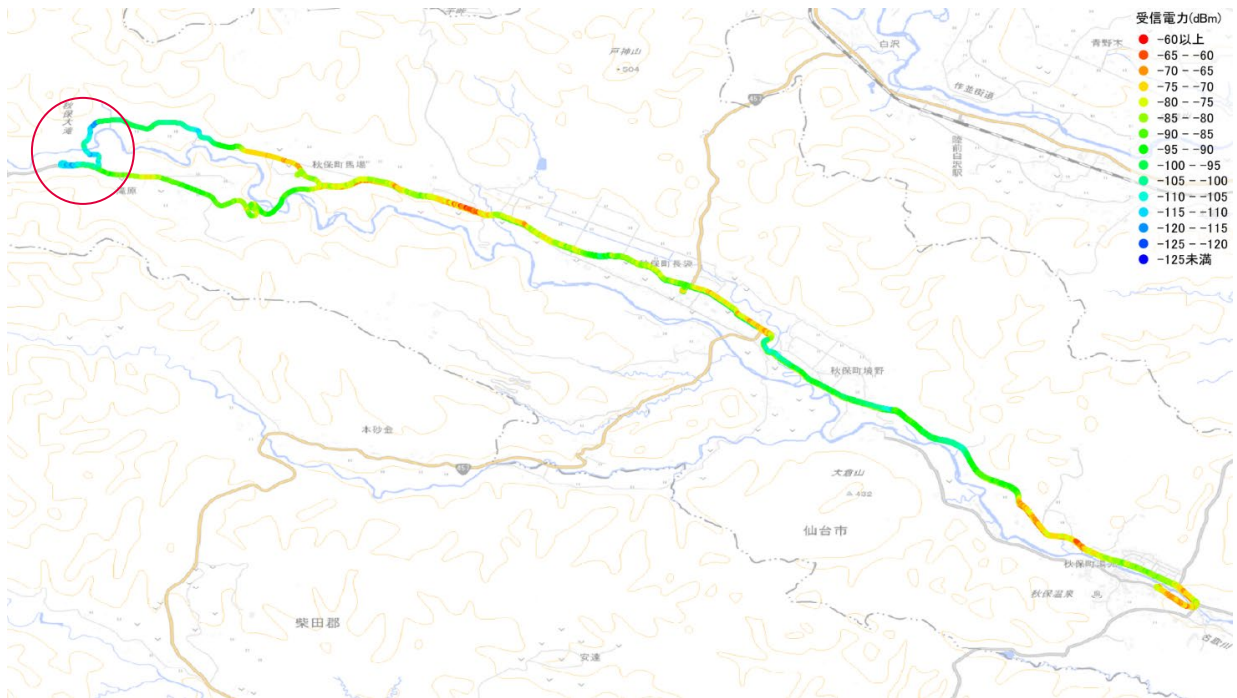


図 24 公衆網 A のエリアカバレッジ ヒートマップ②



図 25 公衆網 A のエリアカバレッジ ヒートマップ③



図 26 不感地帯の地域例①



図 27 不感地帯の地域例②

② 公衆網 B の状況

次に、公衆網 B の状況について、図 28～図 30 に各周回における公衆網 B の受信電力ヒートマップを示す。エリア全体での平均受信電力は -89.8dBm となっている。図中の赤丸の箇所は、受信電力の低い箇所を示している。秋保大滝付近では公衆網 A 同様に受信電力が低くなった他、秋保小学校付近の山道でも受信電力が低下する箇所があった。周囲が木で囲まれている他、当該箇所は谷間になっており、置局の状況によっては電波が届きにくい環境のため受信電力が低いと考えられる。

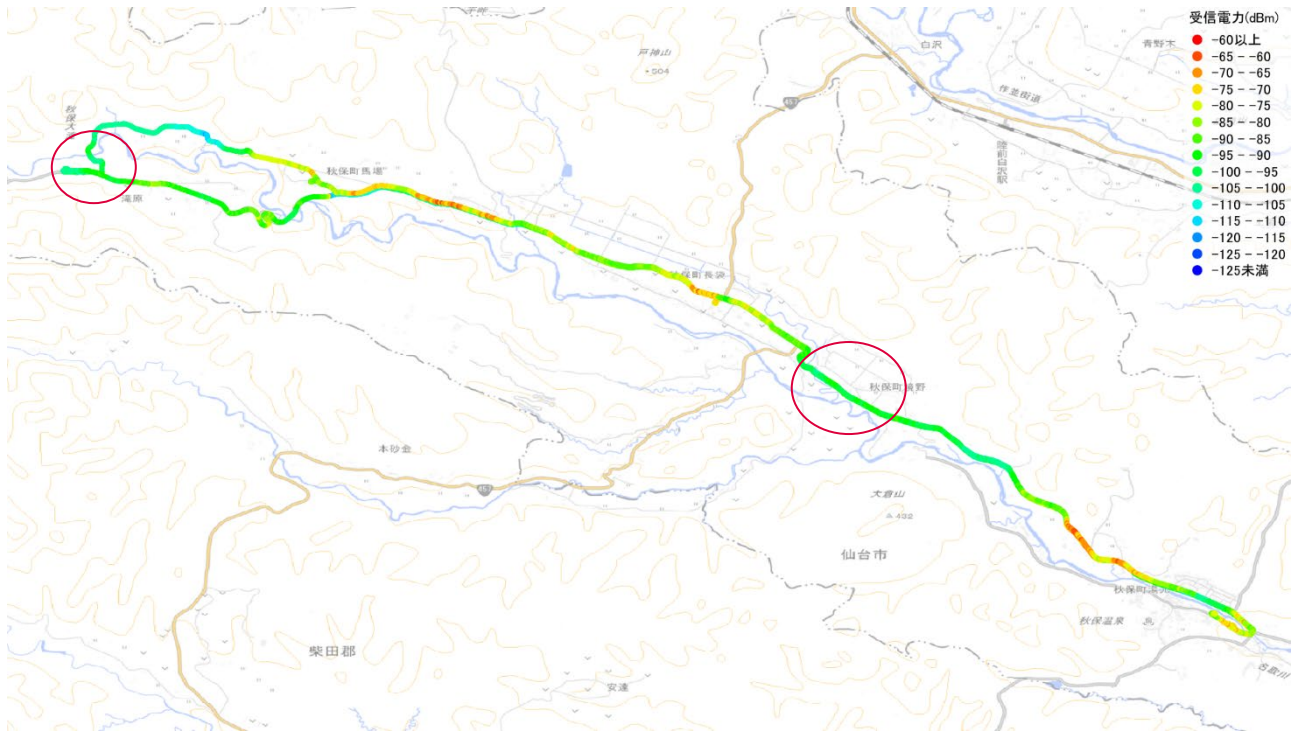


図 28 公衆網 B のエリアカバレッジ ヒートマップ①



図 29 公衆網 B のエリアカバレッジ ヒートマップ②

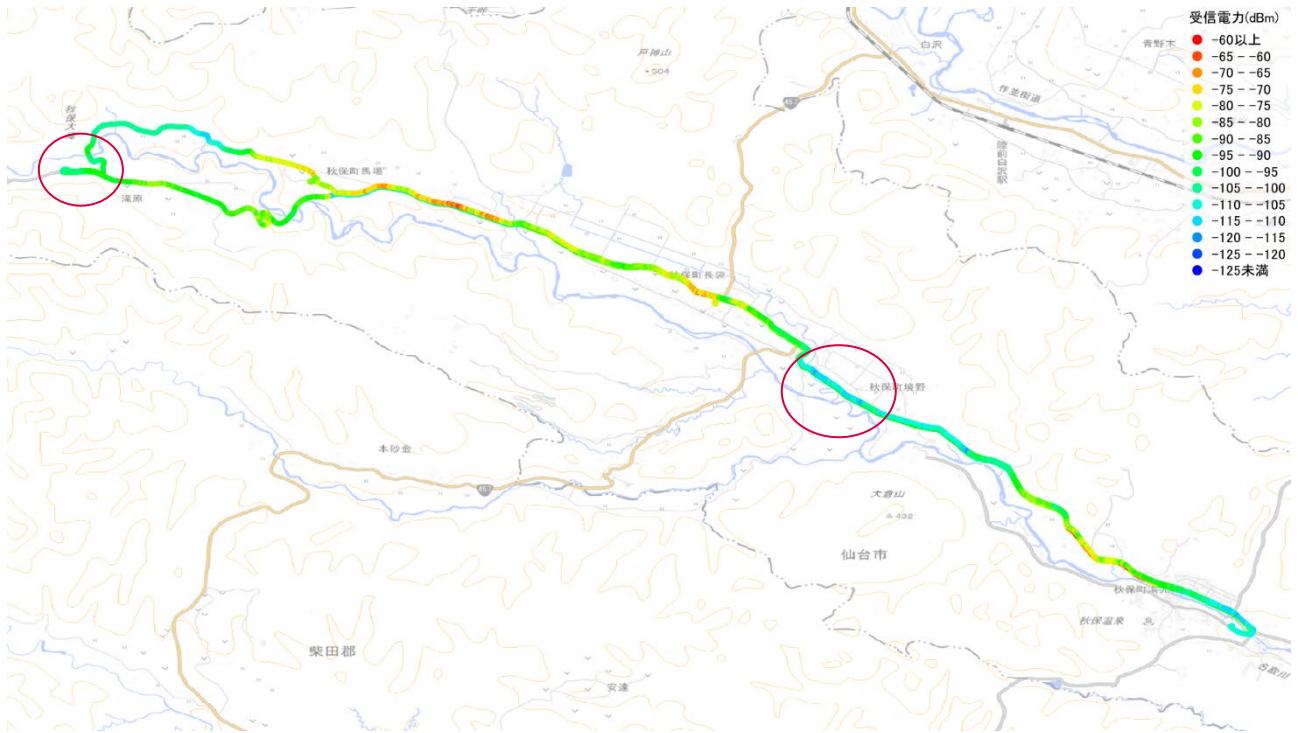


図 30 公衆網 B のエリアカバレッジ ヒートマップ③



図 31 不感地帯の地域例③

③ ローカル 5G の状況

① ②の状況を踏まえると、秋保大滝付近の受信電力は共通して低い傾向である。

公衆網の不感地帯解消のため、秋保大滝に置局されたローカル 5G の状況について述べる。図 32 に秋保大滝周辺での各回線の受信電力の累積確率分布を示す。公衆網とローカル 5G 回線を比較す

ると 50%ile 値でローカル 5G の方が 15dBm 以上優れていることがわかる。

表 22 に示す最小値を見るとローカル 5G が最も受信電力が低くなっている。これは図 33～図 35 に示すヒートマップ赤枠の部分に相当し、エリア端かつ木による遮蔽の影響を受けるエリアのため、受信電力が低くなったものと考えられる。その他の地点については公衆網に比べローカル 5G の方が受信電力は優れており、不感地帯解消の効果が見込める。

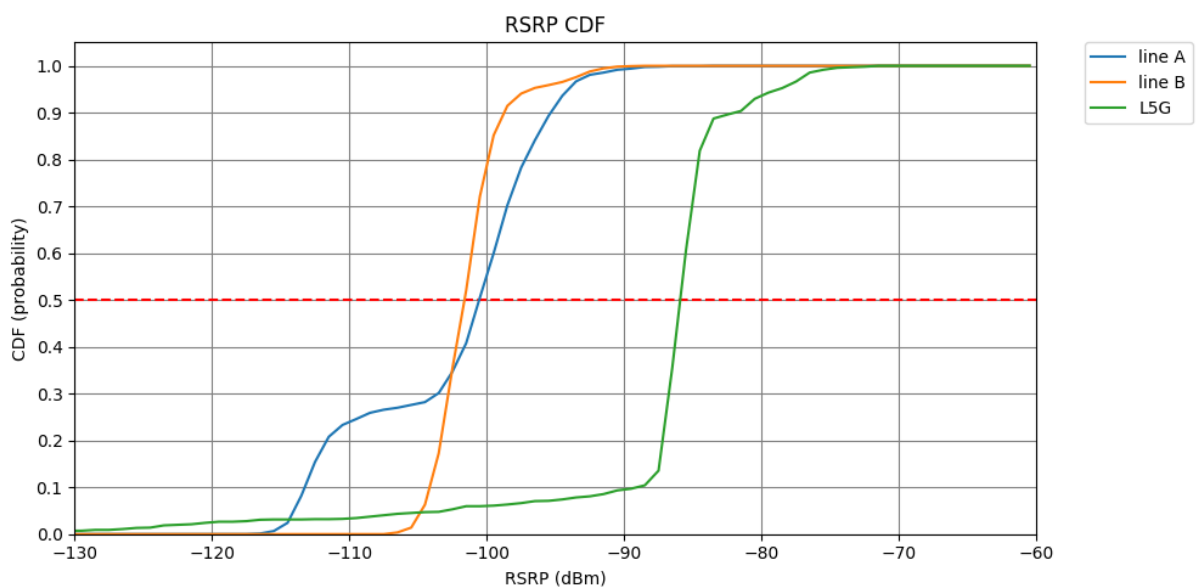


図 32 秋保大滝周辺の公衆網とローカル 5G のエリアカバレッジ CDF

表 22 秋保大滝周辺の各回線のエリアカバレッジ（最小、最大、平均、標準偏差）

	最小 (dBm)	最大 (dBm)	平均 (dBm)	標準偏差 (dBm)	50%ile 値 (dBm)
公衆網 A	-117	-84	-102.5	6.67	-101
公衆網 B	-107	-89	-101.4	2.55	-102
ローカル 5G	-156	-72	-87.4	9.08	-86

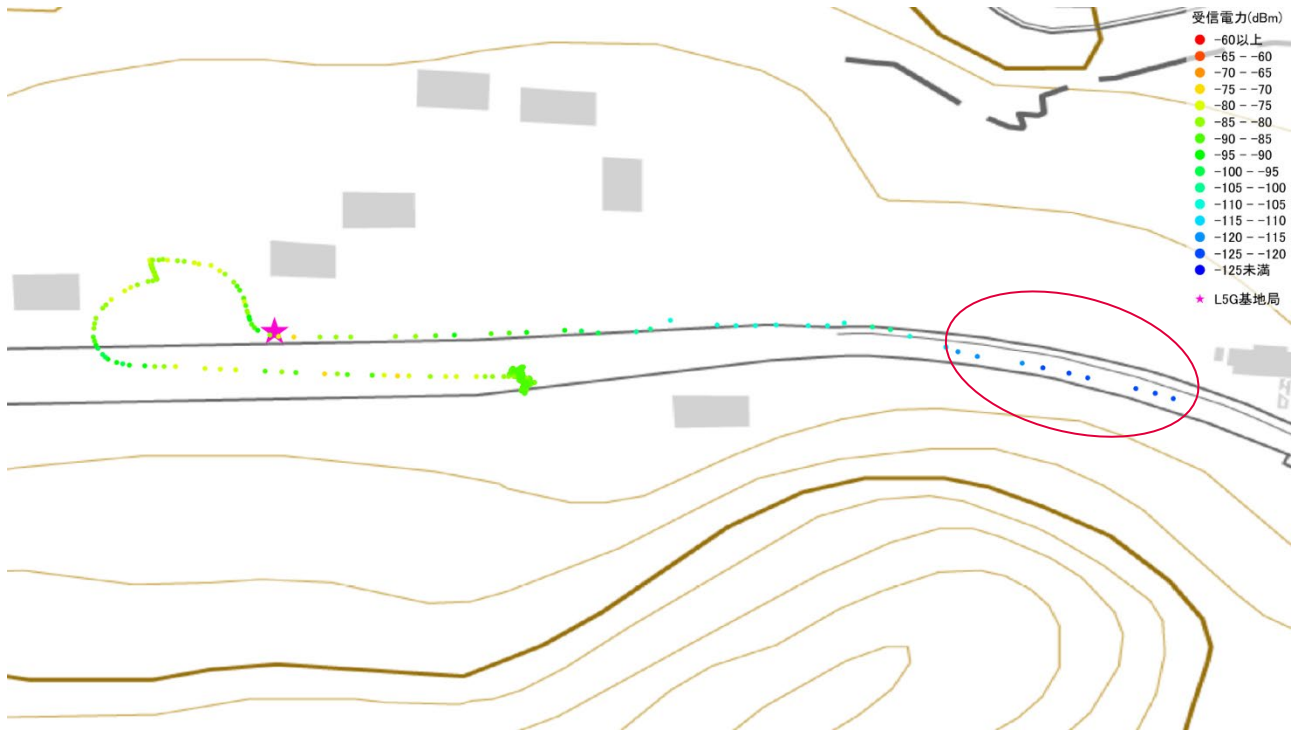


図 33 ローカル 5G のエリアカバレッジ ヒートマップ①

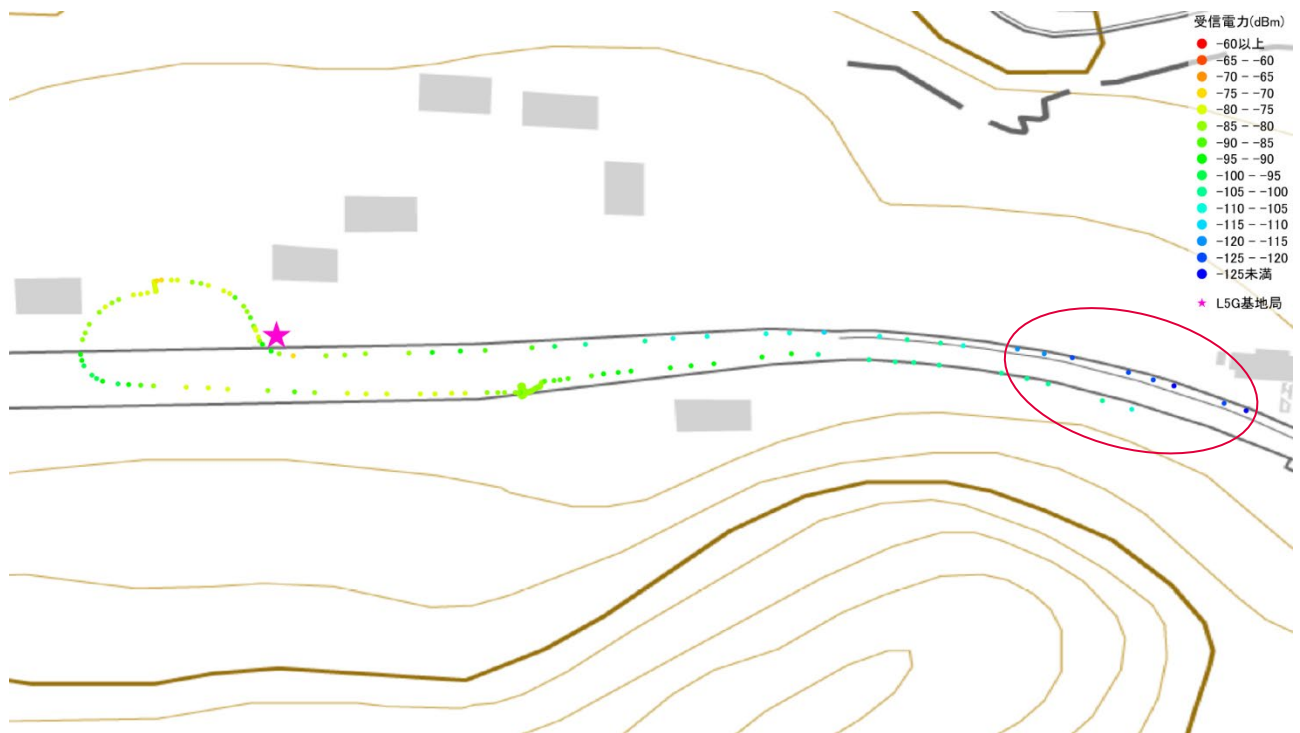


図 34 ローカル 5G のエリアカバレッジ ヒートマップ②

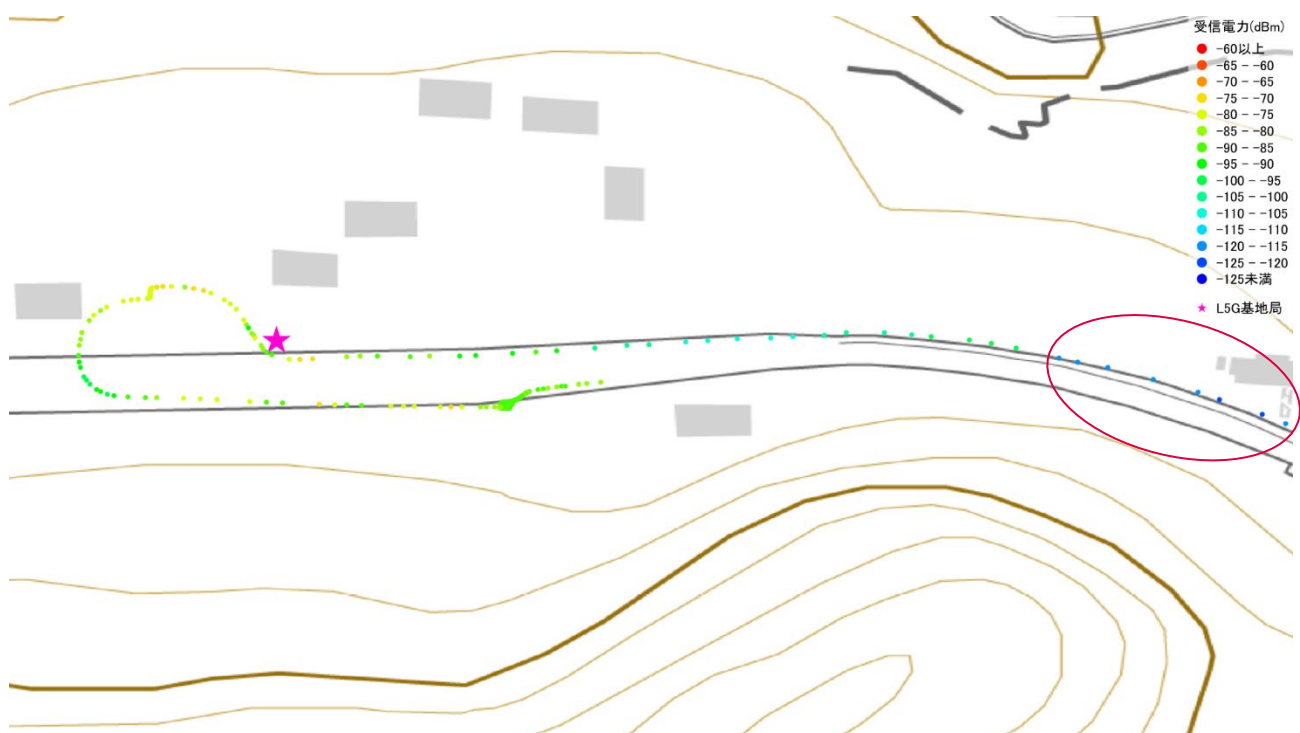


図 35 ローカル 5G のエリアカバレッジ ヒートマップ③

③ 公衆網 A+公衆網 B+ローカル 5G の状況

次に、公衆網 A と公衆網 B およびローカル 5G を協調型インフラ基盤によって併用した場合の状況を述べる。表 23 に示す通り、最小値は-114dBm、平均値は-82.5dBm まで改善している。

また、表 24 には公衆網 A および公衆網 B の 10%ile 値に対する%ile Rank を示している。公衆網 A の 10%ile 値(-103dBm)を下回る確率は 1.9%でエリアカバー率は 98.1%、公衆網 B の

10%ile 値(-103dBm)を下回る確率は 1.2%でエリアカバー率は 98.8%となっており、各技術を組み合わせて使用することによりエリアカバー率 92%を達成していることが確認できた。これは協調型インフラ基盤を活用して公衆網を併用することによって、互いの不感地帯を補うことができたためと考えられる。

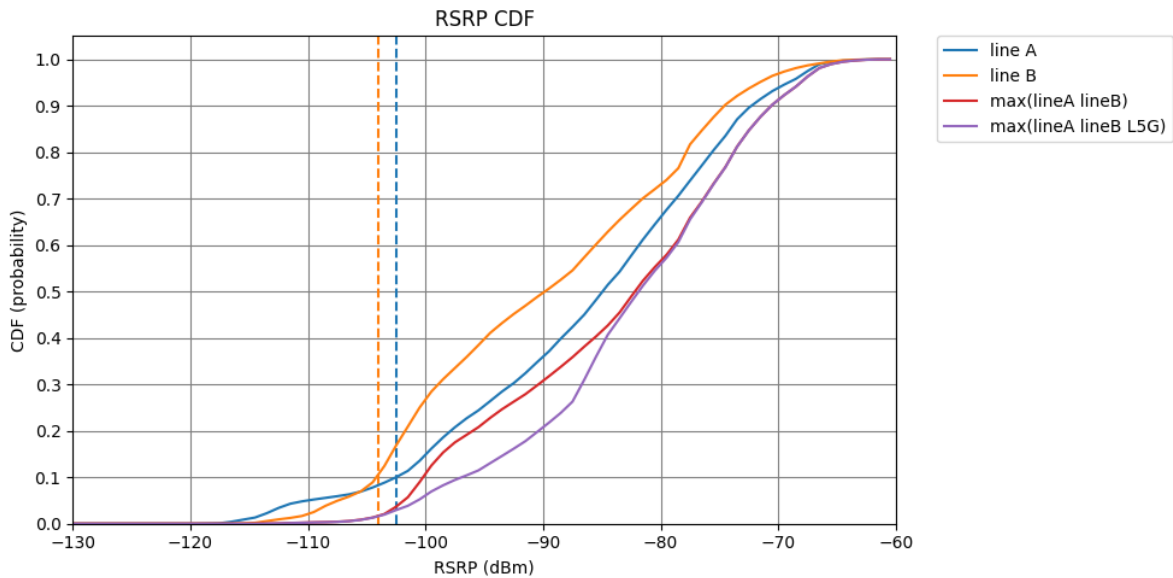


図 36 公衆網と複数回線を組み合わせたときのエリアカバレッジ CDF

表 23 公衆網と複数回線を組み合わせたときのエリアカバレッジ（最小、最大、平均、標準偏差）

	最小 (dBm)	最大 (dBm)	平均 (dBm)	標準偏差 (dBm)
公衆網 A	-119	-59	-86.6	12.0
公衆網 B	-118	-59	-89.8	11.8
2回線 (公衆網 A+B)	-114	-59	-83.2	10.9
3回線 (公衆網 A+B+ローカル 5G)	-114	-59	-82.5	9.68

表 24 公衆網 A 公衆網 B の 10%ile 値に対する%ile Rank

	2回線 (公衆網 A+B)	3回線 (公衆網 A+B+ローカル 5G)
公衆網 A の 10%ile 値(-103dBm)におけるデータの割合	2.0%	1.9%
公衆網 B の 10%ile 値(-104dBm)におけるデータの割合	1.3%	1.2%

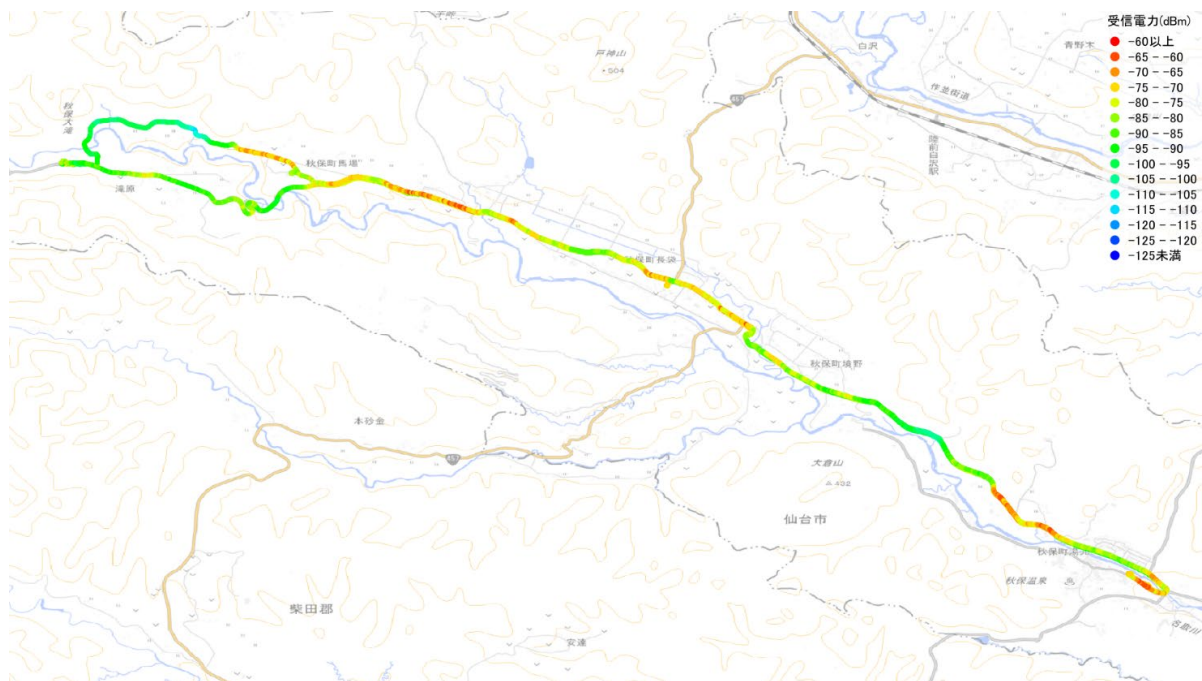


図 37 公衆網と複数回線を組み合わせたときのエリアカバレッジ ヒートマップ①

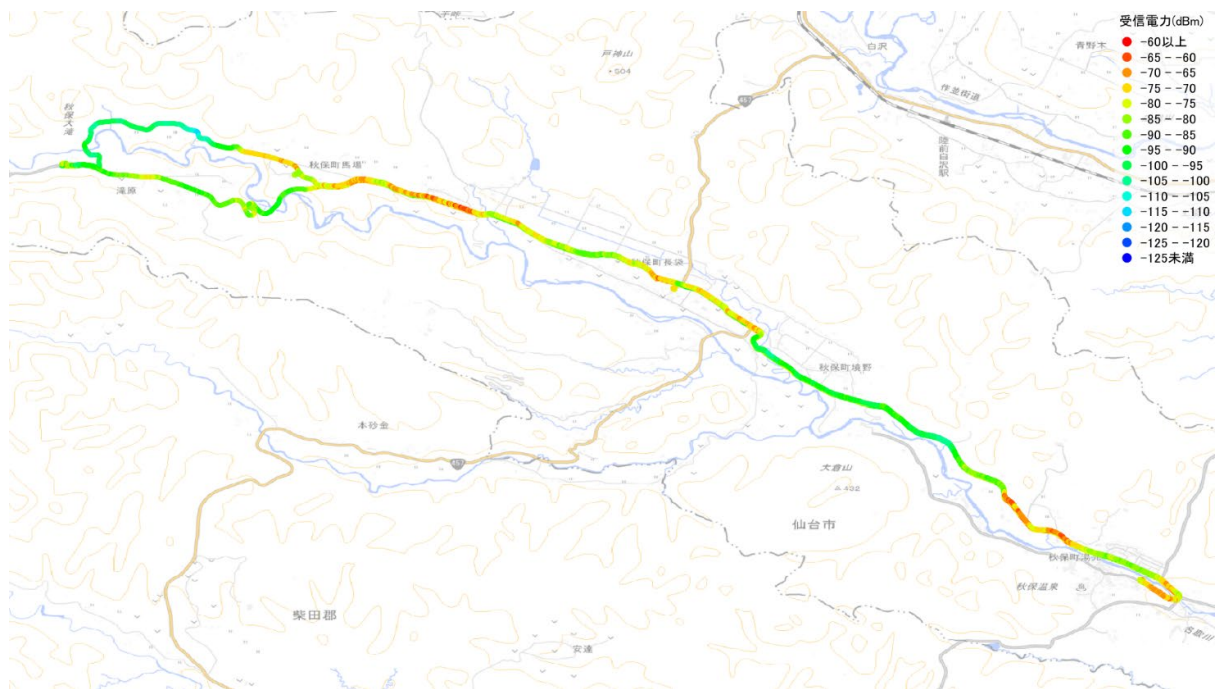


図 38 公衆網と複数回線を組み合わせたときのエリアカバレッジ ヒートマップ②

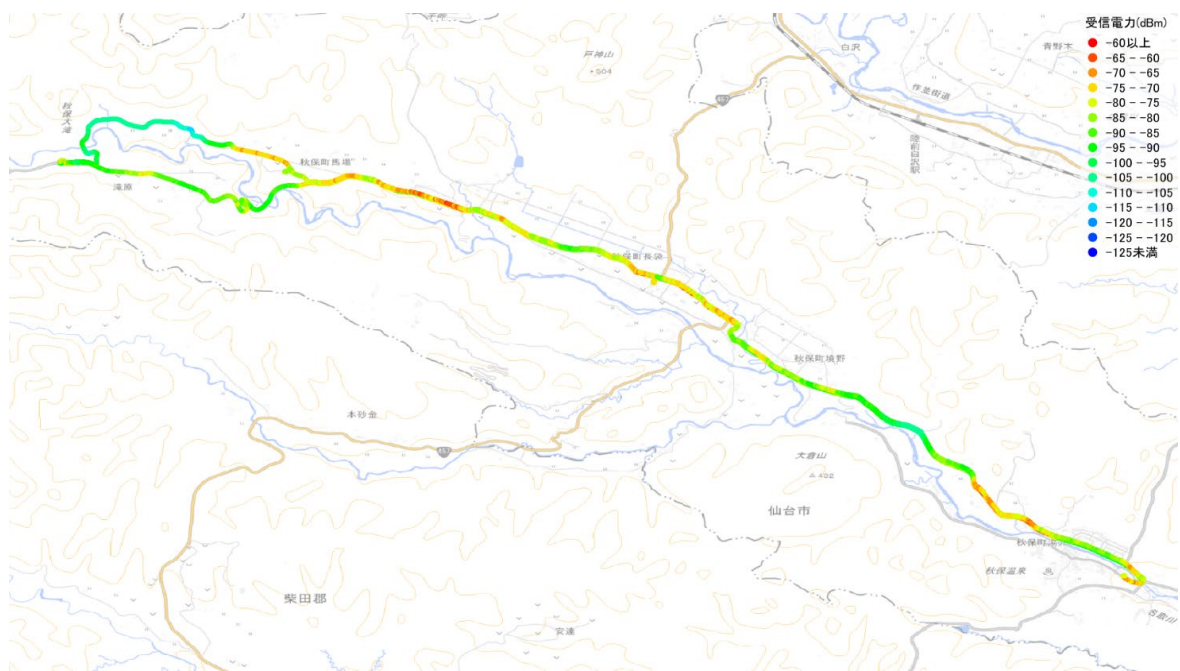


図 39 公衆網と複数回線を組み合わせたときのエリアカバレッジ ヒートマップ③

(3) 複数キャリアネットワークとローカル 5G の重畳エリアにおける常時映像監視・車両制御の実施可否の計測

本項目では、複数の公衆キャリアネットワークおよびローカル 5G が重畳する通信環境下において、遠隔からの常時映像監視および車両制御が実運用上実施可能であるかについて評価を行った。

交通事業者および遠隔監視員を対象としたアンケート(有効回答数 n=2)では、常時映像監視の視認性、操作応答性、通信の安定性、車両制御の妥当性に関する設問において、2 名(100%)が「良好」

と回答した。これにより、複数回線を統合した通信構成において、遠隔監視および車両制御に必要な情報取得および操作が実運用において支障なく実施できる水準にあることが確認された。

以上より、本実証環境においては、複数キャリアネットワークとローカル 5G を組み合わせた通信構成により、常時映像監視および車両制御は実施可能であるとの評価結果が得られた。

3) KPI/KGI との比較結果

表 25 ユースケース①における KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	ローカル 5G エリアおよびキャリアネットワークの重畳エリアにおける自動運転バスの運行について、常時映像監視が可能であること。
	(2)	ローカル 5G およびキャリアネットワークが重畳した路面凍結路において、路面状況判断システムのアシスト内容による車両制御が可能であること。
定量評価	(3)	複数キャリアネットワークとローカル 5G を統合し、エリアカバー率が 92% になること。

(1) ローカル 5G エリアおよびキャリアネットワークの重畳エリアにおける自動運転バスの運行について、常時映像監視や車両制御が可能であること。【定性評価】

本実証においては、交通事業者の遠隔監視員 2 名を対象にアンケート調査を実施し、遠隔監視システムの映像品質、通信遅延、車両状態把握および車両制御の妥当性等について定性的な評価を収集した。遠隔監視における映像品質については、ローカル 5G エリアおよびキャリアネットワーク重畳エリアにおいて、一部の区間で短時間の映像フリーズが確認されたものの、監視業務に支障を来す程のものではなく、全体としては安定した監視が可能であったとの評価が得られた。また、遠隔監視に必要な映像品質および解像度についても、運行判断に影響を与える場面は確認されなかったと回答されている。

(2) ローカル 5G およびキャリアネットワークが重畳した路面凍結路において、路面状況判断システムのアシスト内容による車両制御が可能であること。【定性評価】

同上の通り、遠隔監視員 2 名を対象にアンケート調査を実施した。車両制御に関しては、路面状況判断システムによる凍結情報の判断精度について、実際の路面状況と概ね一致しており、凍結状態やシャーベット状態が色別に連続して可視化されている点が、運転判断において有効であるとの評価が示された。また、路面状況に応じた減速制御についても、登坂・降坂や斜度に応じて減速タイミングおよび設定速度がきめ細かく制御されており、乗車中も安心感が得られたとの意見が得られている。

以上より、遠隔監視員 2 名による定性評価ではあるものの、遠隔監視システムの映像品質および通信性能、ならびに路面状況に応じた車両制御について、実証環境下において運用上大きな支障は認められず、実運用を想定した遠隔監視および車両制御の成立性が確認された。

(3) 複数キャリアネットワークとローカル 5G を統合し、エリアカバー率が 92%になること。

【定量評価】

本実証におけるエリアカバー率が 92%(ローカル 5G またはキャリアの周波数において最低受信感度 -126 dBm 上回るエリア)の目標については、車載用機材の調達のみで目標を達成した。

追加解析として各公衆網の 10%ile 値を閾値にした場合におけるエリアカバー率を算出したが、複数キャリアネットワークとローカル 5G を統合した場合は単回線利用時に対して +8.1%以上の改善効果がみられ、エリアカバー率 92%は達成されている。

4) 成果・課題

(1) エリアおよびキャリアネットワークの重畳エリアにおける自動運転バスの運行について、常時映像監視や車両制御が可能であること。

【成果】

本実証では、エリアカバーおよびキャリアネットワークが重畳した通信環境下において、自動運転バスの常時映像監視が可能であることを確認した。走行中の遠隔監視映像は遠隔監視室において継続的に取得・表示され、遠隔監視員による運行状況の把握および必要に応じた判断に支障が生じる場面は確認されなかった。また、通信品質が一定水準で確保されている区間においては、遠隔監視と車両制御が安定的に機能しており、複数ネットワークを活用した構成により、実証運行に必要な信頼性を確保できることが示された。

【課題】

本実証を通じて、ローカル 5G およびキャリアネットワークの重畳エリアにおいて、常時映像監視および車両制御が可能であることを確認した一方、今後の実運用を見据えた検討事項として、通信品質は実証期間を通じて安定していたものの、通信品質の継続的な把握の必要性が今後の検討事項として整理されている。これらは、本実証において直ちに運行上の支障が確認されたものではなく、将来的な本格運用・展開を見据えた際に、さらなる信頼性・安定性を確保する観点から整理された課題である。

(2) ローカル 5G およびキャリアネットワークが重畳した路面凍結路において、路面状況判断システムのアシスト内容による車両制御が可能であること。

【成果】

本実証では、ローカル 5G およびキャリアネットワークを重畳した通信環境下において、路面凍結が想定される区間で取得した路面状況情報を活用し、路面状況判断システムによるアシストを受けた車両制御が可能であることを確認した。凍結リスクが高いと判断される区間においては、減速や停止といった車両制御が適切に行われ、冬季環境下における安全性向上に寄与する挙動が確認された。

また、遠隔監視員および交通事業者からの定性評価においても、車両挙動に大きな違和感はなく、路面状況判断システムによる制御が運行上受容可能な水準であることが示された。

【課題】

ローカル5G およびキャリアネットワークが重畳した環境下において、路面状況判断システムのアシスト内容に基づく車両制御が可能であることを確認した一方で、今後に向けた検討事項として以下の点が整理されている。

- 凍結・積雪といった路面状況は気象条件や時間帯により変化するため、より多様な路面状態・環境条件下でのデータ蓄積および検証の必要性
- 路面状況判断の結果を踏まえた車両制御について、走行モード切り替えや減速挙動のさらなる最適化に向けた検討余地

これらは、実証において車両制御が不適切であったことを示すものではなく、路面凍結路における安全性・走行安定性をより一層高めるため、今後の実証フェーズで継続的に検討すべき事項として整理されたものである。

(3) 複数キャリアネットワークとローカル 5G を統合し、エリアカバー率が 92%になること。

【成果】

協調型インフラ基盤を導入することで、一部エリアで特定の公衆網の品質が悪くなくても、他に良好な回線が存在する場合は相互補完して接続維持できることを確認した。

また、秋保大滝付近では各公衆網ともに不感地帯となっていたが、ローカル 5G によるローカル通信網を付与することにより部分的なエリア拡大が実現できた。

【課題】

秋保大滝から馬場市民センターに向かう区間では、一部受信電力の弱いエリアが発生している。秋保大滝周辺に比べ道が狭く、周辺に追加の基地局設備を配備するのが難しい箇所については、エリアをどのように拡大するかが課題となる。

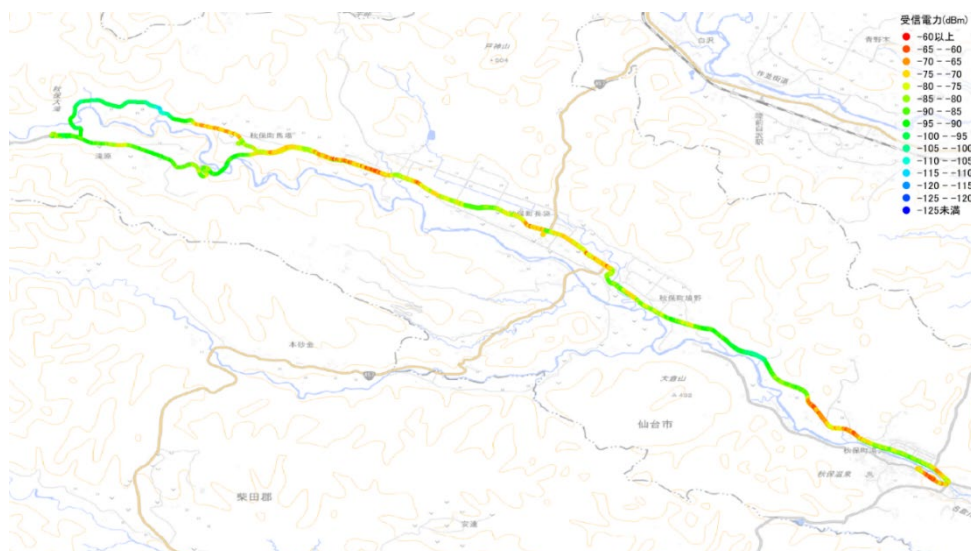


図 40 秋保大滝から馬場市民センターに向かう区間の弱電界エリア ヒートマップ



図 41 秋保大滝から馬場市民センターに向かう区間の弱電界エリア

6.2 ②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保

6.2.1 協調型インフラ基盤× Cradio による複数キャリアネットワークの通信リソース統合の最適化検証

1) 実証スケジュール

表 26 ユースケース②における実証スケジュール

ルート	フェーズ	2025年			2026年	
		5月～10月	11月	12月	1月	2月
秋保	準備	要件検討、システム・KPI 設計、申請		開発、実装、試験	調律走行	
	実証				本番走行	
	評価				データとりまとめ	

2) 開発・評価項目の結果

表 27 ユースケース②における開発・評価項目(1)

番号	開発・評価項目
(1)	協調型インフラ基盤× Cradio による複数回線の統合システムの開発
(2)	協調型インフラ基盤× Cradio を利用した場合のアップリンクスループットおよび常時映像監視・車両制御の実施可否の計測

(1) 協調型インフラ基盤× Cradio による複数回線の統合システムの開発

車内外映像(1Mbps x 5 ストリーム)・テレメトリ情報(1Mbps)をアップリンクし、そのデータを協調型インフラ基盤×Cradio により複数回線を統合して伝送するシステムを開発した。なお映像伝送についてはエンコーダでのビットレート揺らぎが発生するため、送受信ビットレートを回線ごとに比較し、データの到達性と複数回線の併用度合いを確認できる計測系を構築した。

(2) 協調型インフラ基盤× Cradio を利用した場合のアップリンクスループットおよび常時映像監視・車両制御の実施可否の計測

表 28 に送受信アップリンクビットレートの周回平均値を示す。ここで、送受信ビットレートはそれぞれ各 5G ルータに入力される直前と、協調型インフラ基盤にて受信統合処理が行われる直前で観測した IP スループットである。協調型インフラ基盤を用いて接続回線数を増やすことで送信・受信ビットレートがそれぞれ増加していることが分かる。3 回線を統合して接続した場合において、送信ビットレートは目標の 6 Mbps 程度を達成している。ここで、送信ビットレートが接続回線数に依存するのは映像伝送システムに備わる輻輳制御メカニズムにより、帯域が不足する場合に送信が抑制されるためである。

また、いずれの構成においても受信ビットレートが送信ビットレートに対して有意に低く、一部で不達データが生じていることが分かる。接続回線数を増やすことで平均ビットレートの増加がみられるものの、目標値の 6 Mbps を達成していない。なお協調型インフラ基盤では再送・前方誤り訂正符号(FEC)を適用しているため一部の不達が直ちに遠隔監視の映像品質等の劣化につながる訳ではないため、業務影響については別項の定性評価にて述べる。

表 28 統合後アップリンクビットレート平均値

接続回線数	送信ビットレート	受信ビットレート
3 回線(公衆網 A+B+ローカル 5G)	6.3 Mbps	5.2 Mbps
2 回線(公衆網 A+B)	5.8 Mbps	4.9 Mbps
1 回線(公衆網 A)	3.7 Mbps	3.3 Mbps
1 回線(公衆網 B)	5.4 Mbps	4.5 Mbps

測定データセットを表 29 に示す。本試験における 1 周回の走行距離が約 29km と長く、1 秒 1 サンプルのデータを取得しているため 1 周回のみでも 5000 サンプル前後のデータを取得できている。加えて遠隔監視の運用影響(品質劣化)が生じない 3 回線統合時のみ複数試行のデータを取得して開発技術の効果の再現性を確認している。以降同一のデータセットについて詳細を確認する。

表 29 測定データセット一覧

	#	測定日	時間帯	サンプル数
3 回線 (公衆網 A+B+ローカル 5G)	3-1	2026.1.13	2 周目	6600
	3-2	2026.1.19	3 周目	4680
	3-3	2026.1.21	3 周目	5280
2 回線(公衆網 A+B)	2-1	2026.1.15	1 周目	5220
1 回線(公衆網 A)	1a	2025.12.22	1 周目	4860
1 回線(公衆網 B)	1b	2025.12.25	3 周目	4680
1 回線(ローカル 5G)	1c	2026.1.15	2 周目 (ローカル 5G 区間は計 5 ラップ分) Lap1:14:54-14:59 Lap2:15:03-15:07 Lap3:15:11-15:14 Lap4:15:18-15:27 Lap5:15:38-15:45	5580

次に、各回線および統合後のビットレートについて、時間・位置依存性を確認する。図 42～図 46 に送受信アップリンクスループット時間変動、図 47～図 51 にアップリンク受信スループットのヒートマップを示す。図 42～図 46 の通り、各構成のスループットの時間変動は大きいものの、協調型インフラ基盤により常時 2 回線の公衆網が併用できており、秋保大滝付近ではローカル 5G も含め 3 回線を並行利用できていることが分かる。また、図 47～図 51 のヒートマップの通り、3 回線・2 回線併用時において受信ビットレートの落ち込みは 1 回線接続時においても両公衆網でのスループットが低い場所(ルート上の北西端にある秋保大滝近傍)にて発生していることが分かる。

一方で、図 52～図 55 から送信ビットレートの変動幅が大きいことが確認できる。送信ビットレートは車載PCから各回線の 5G ルータにデータが伝送される際のビットレートを測定しており、協調型インフラ基盤では送信帯域制御を行っていないことから、これは映像伝送アプリケーションの挙動に起因するものと考えられる。具体的には以下の 2 つの要因が考えられる。

- (1) 本システムにおいて、映像のエンコードは厳密な固定ビットレートではないため、入力映像のフレーム間変動の大きさ等によってビットレートにブレが生じる。
- (2) 本システムでは映像伝送の下位レイヤが TCP となっており、TCP の輻輳制御により送信帯域が抑制(送信データがバッファリング)されることがある。

このことを間接的に確認するため、映像伝送アプリケーションとは異なる協調型インフラ基盤のレイヤで観測しているプローブパケットによる無線区間 RTT (Round Trip Time)の時間変動例を図 52 に示す。図の通り、RTT の増大はごく一部の時間のみで発生しており、端末観点で回線の輻輳発生は限

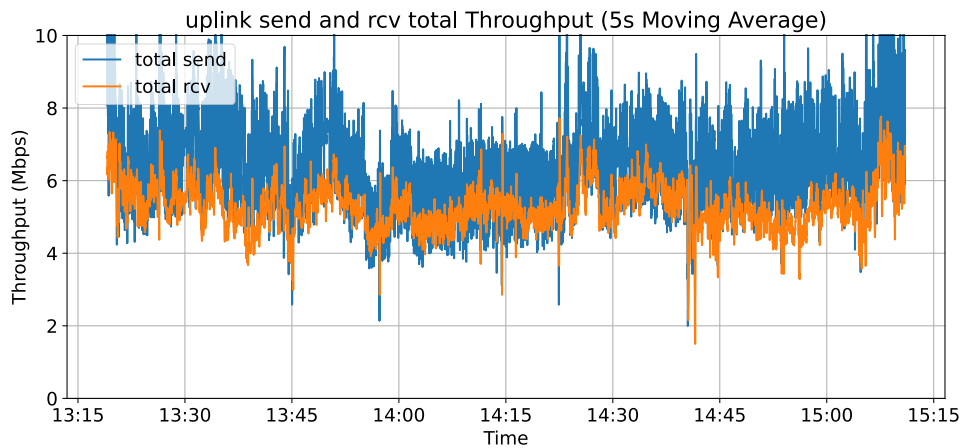
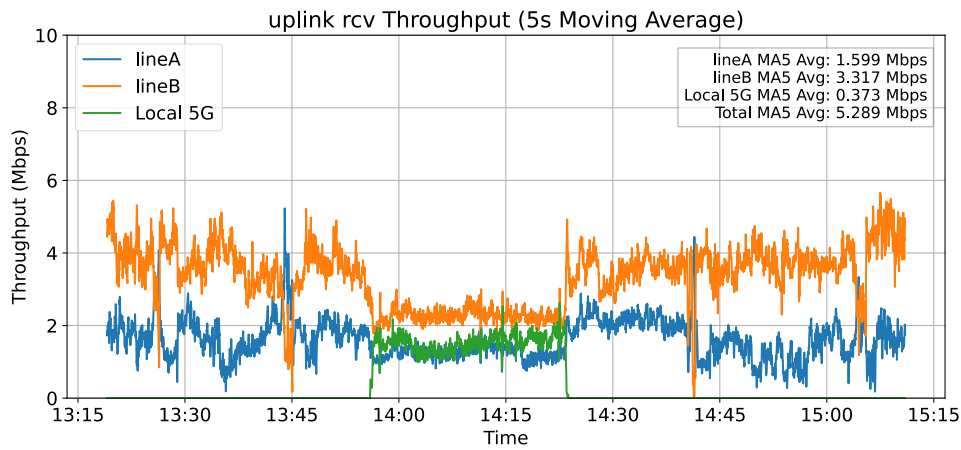
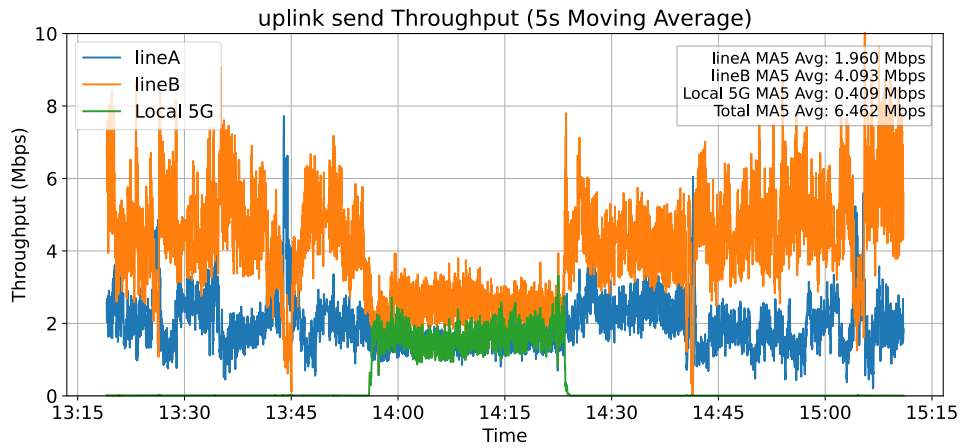
定的であることを示している。このことから上記 2 点のアプリケーション固有の挙動と考えられる。

なお、RTT の増大タイミングは送信ビットレートの回線分配割合が瞬間的に大きく変動している時間と合致していることが多い。一方の回線での瞬時的な帯域不足(ハンドオーバー失敗や瞬間的なシャドウイング)等の要因による遅延増大でもう一回線に多くのデータを割り当てる協調型インフラ基盤による冗長回線接続を生かした救済措置が動作していることが分かる。

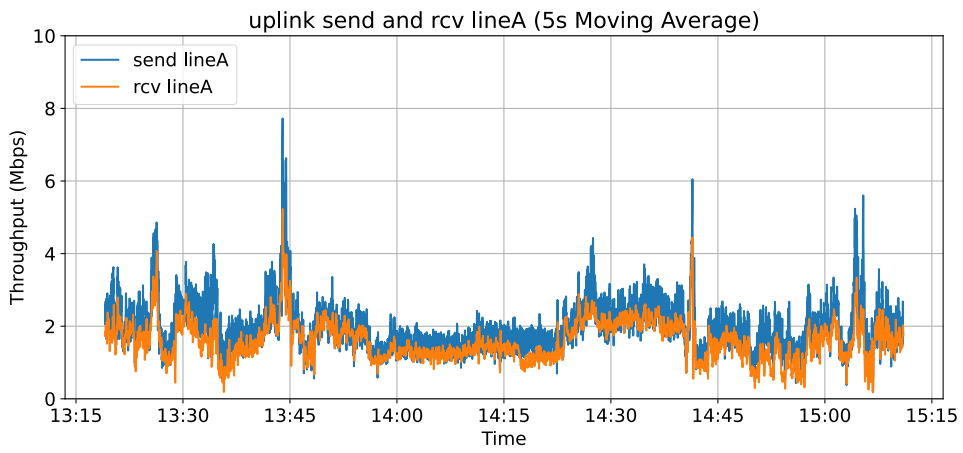
3 回線統合後

(1) 2026.1.13 #2

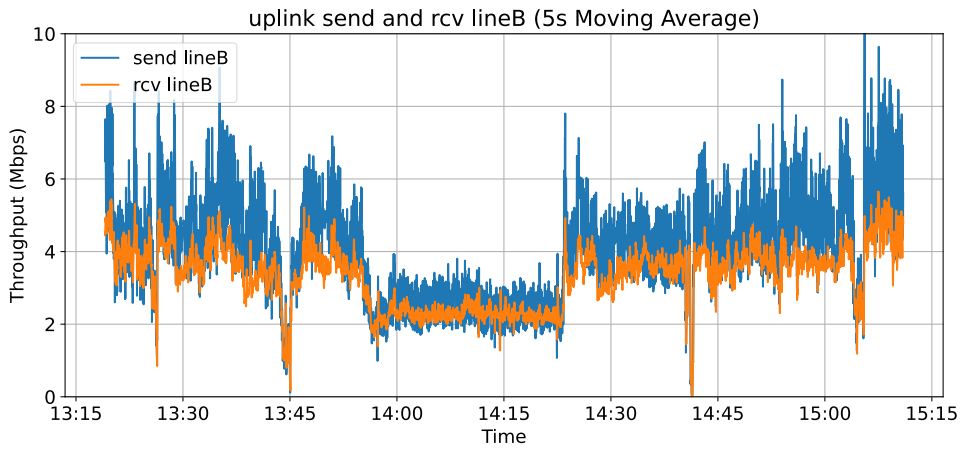
(1-0) 統合後



(1-1) 公衆網 A

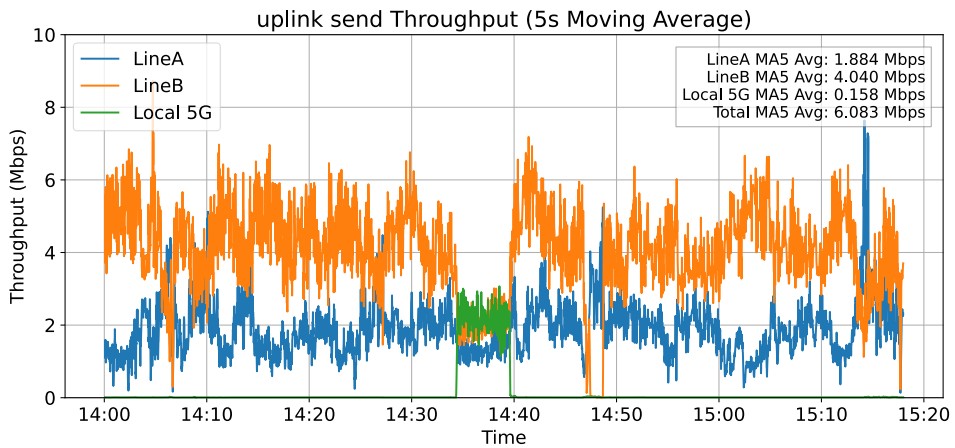


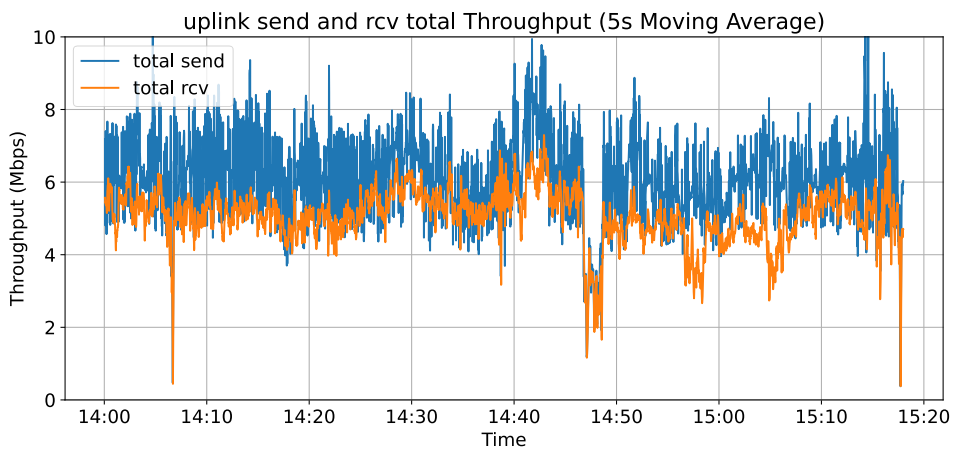
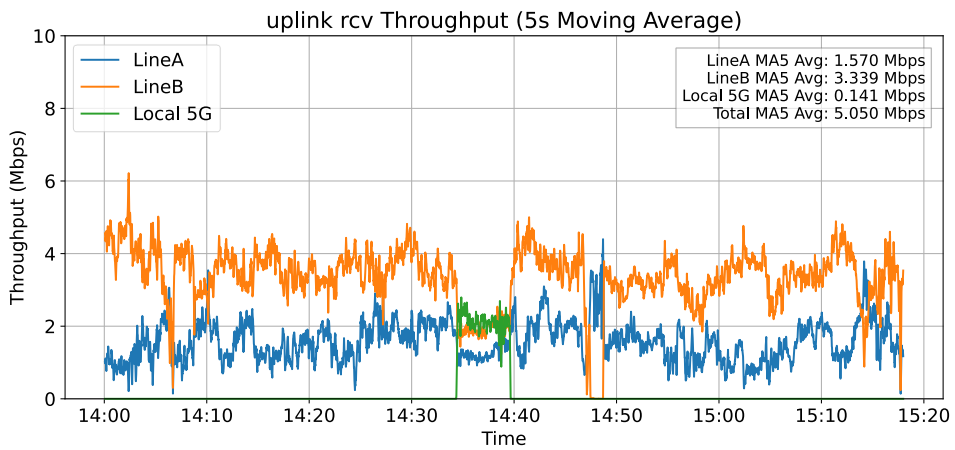
(1-2) 公衆網 B



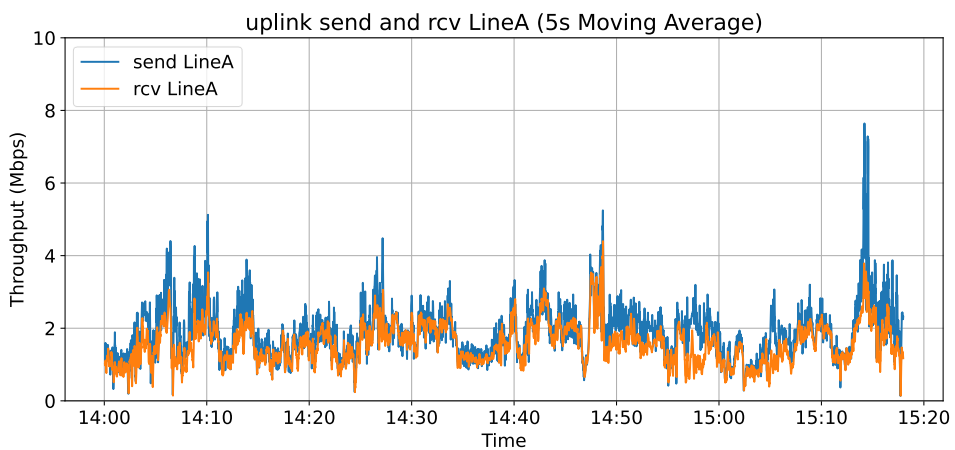
(2) 2026.1.19 #3

(2-0) 統合後

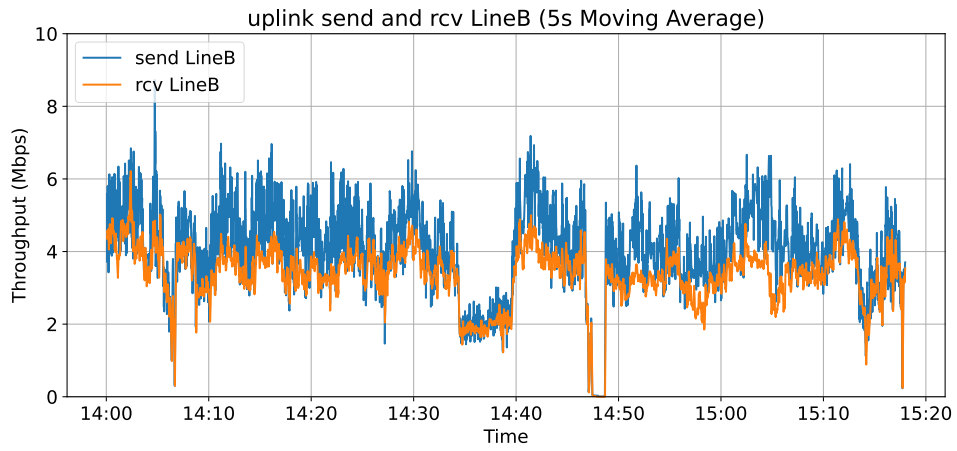




(2-1) 公衆網 A

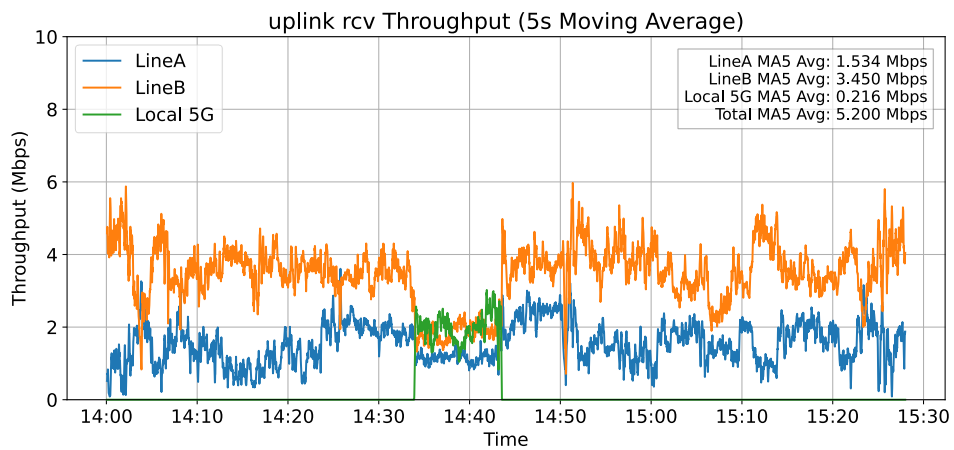
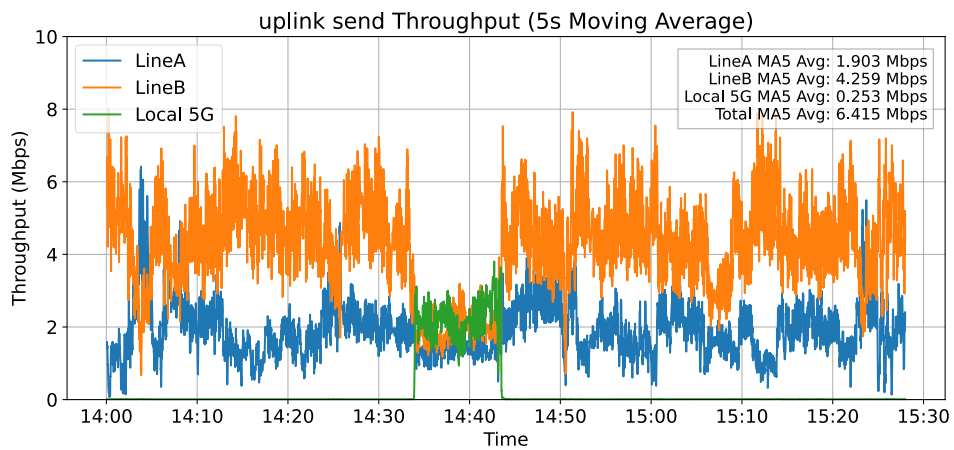


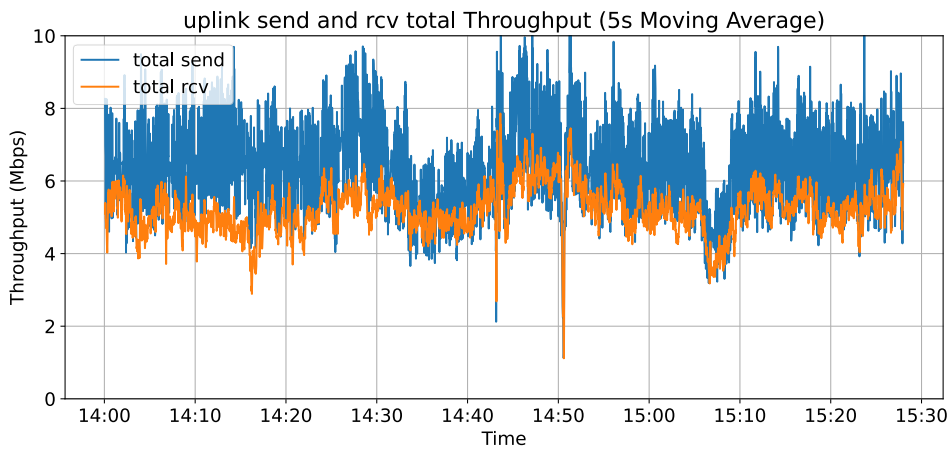
(2-2) 公衆網 B



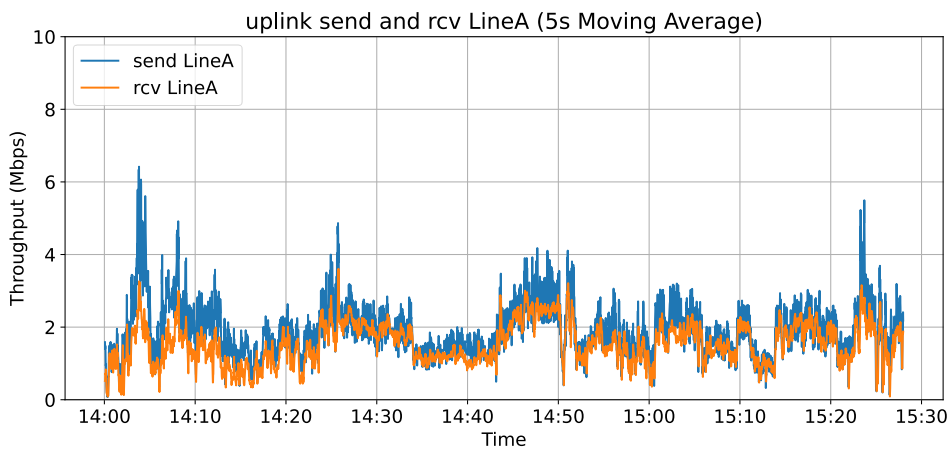
(3) 2026.1.21 #3

(3-0) 統合後





(3-1) 公衆網 A



(3-2) 公衆網 B

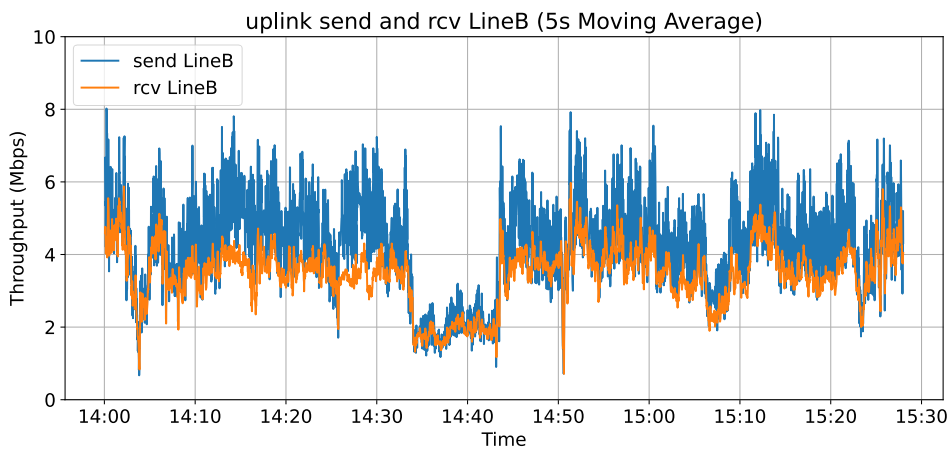
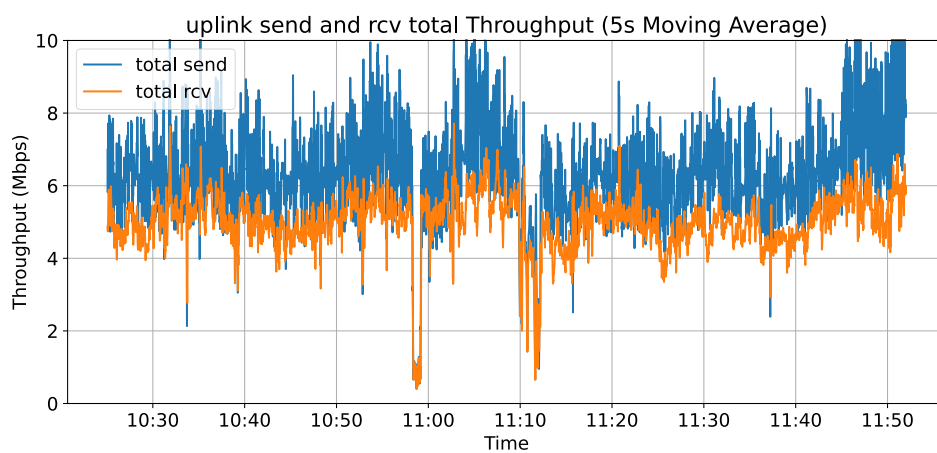
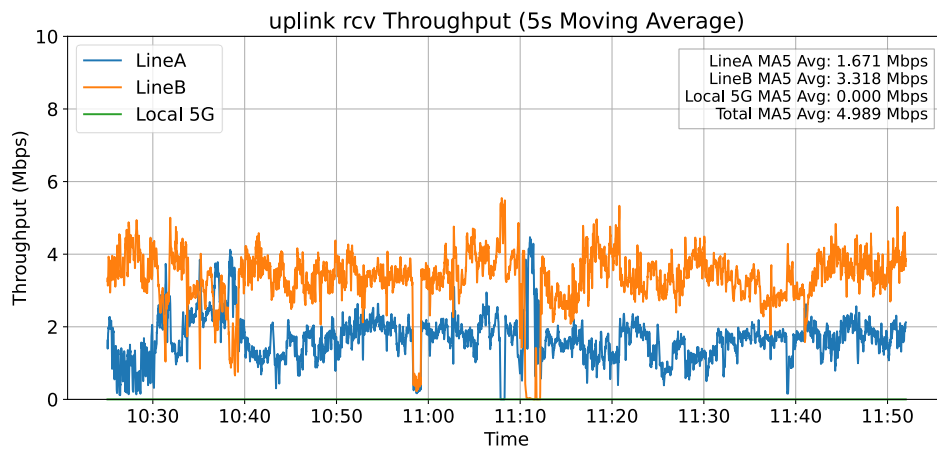
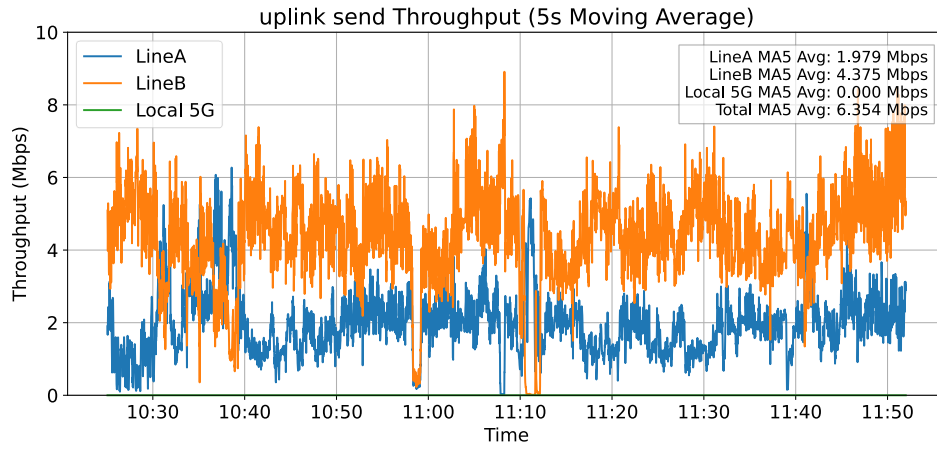


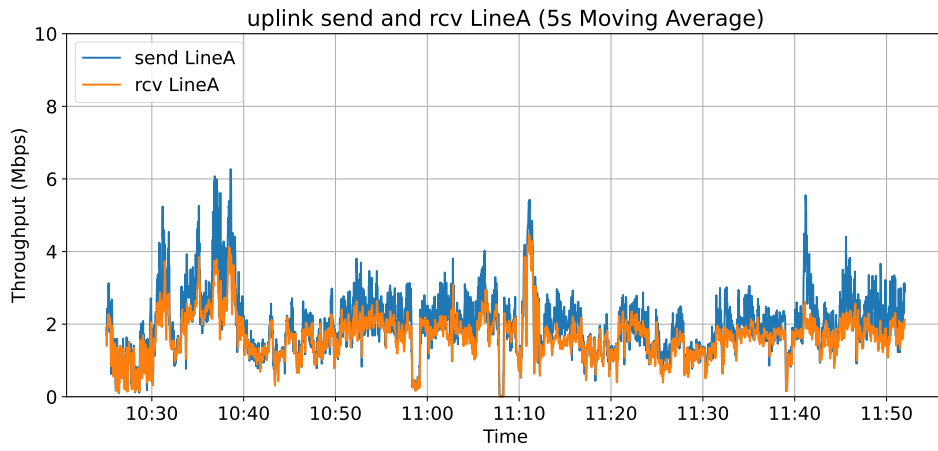
図 42 送受アップリンクスループット時間変動(回線 A+B+ローカル 5G)

2 回線統合時(公衆網 A+公衆網 B) (2026.1.15 #1)

(0) 統合後



(1) 公衆網 A



(2) 公衆網 B

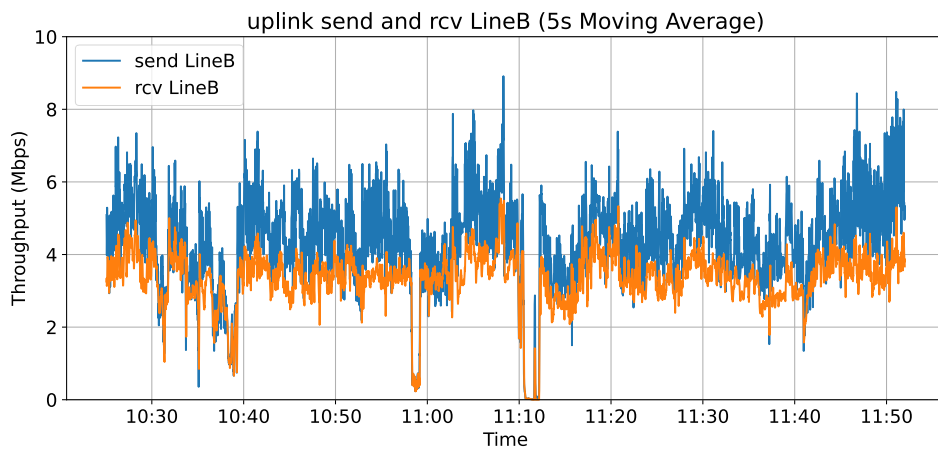


図 43 送受アップリンクスループット時間変動(回線 A+B)

公衆網 A
2025.12.22

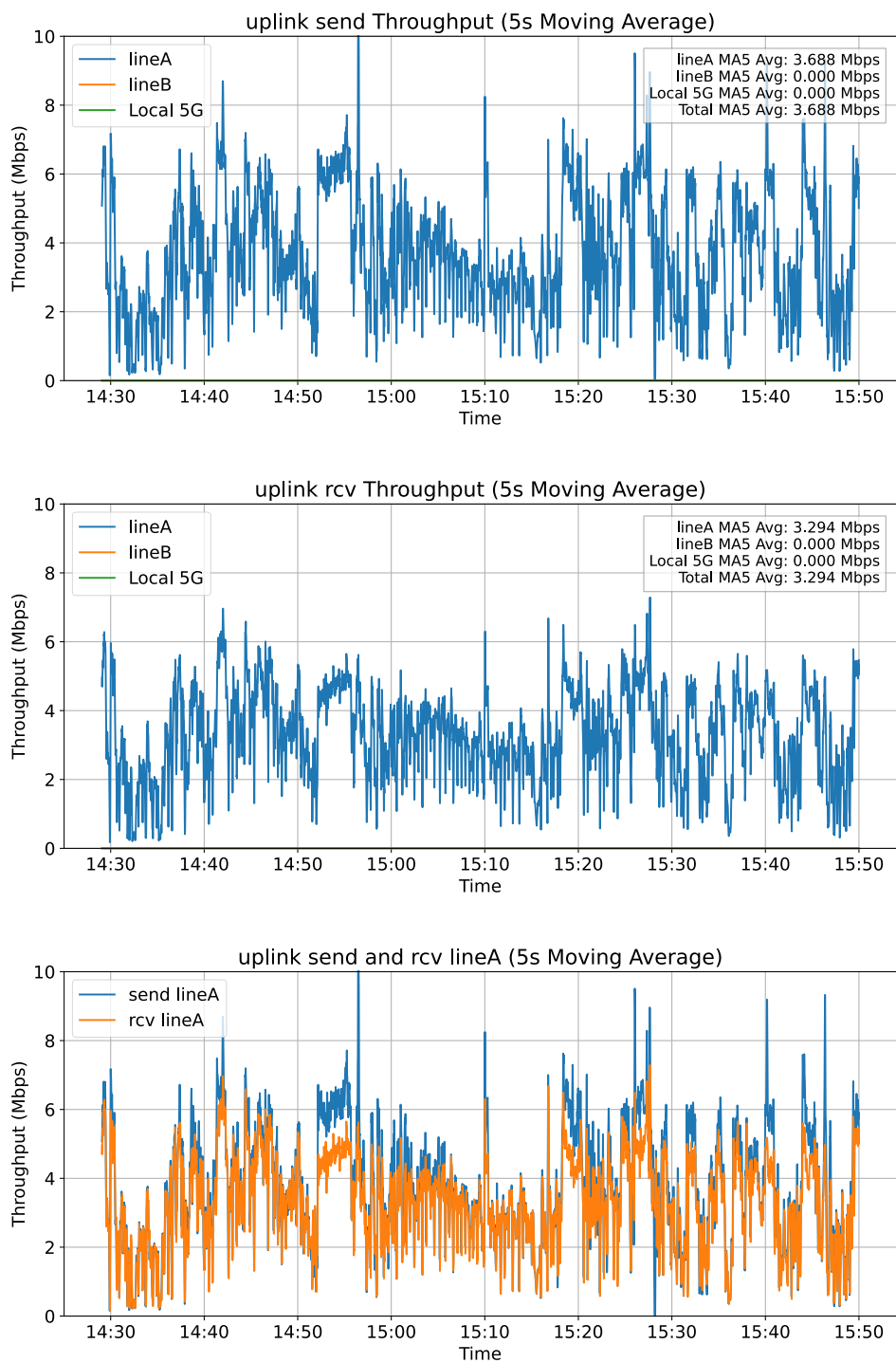


図 44 送受アップリンクスループット時間変動(回線 A 単独)

公衆網 B
2025.12.25

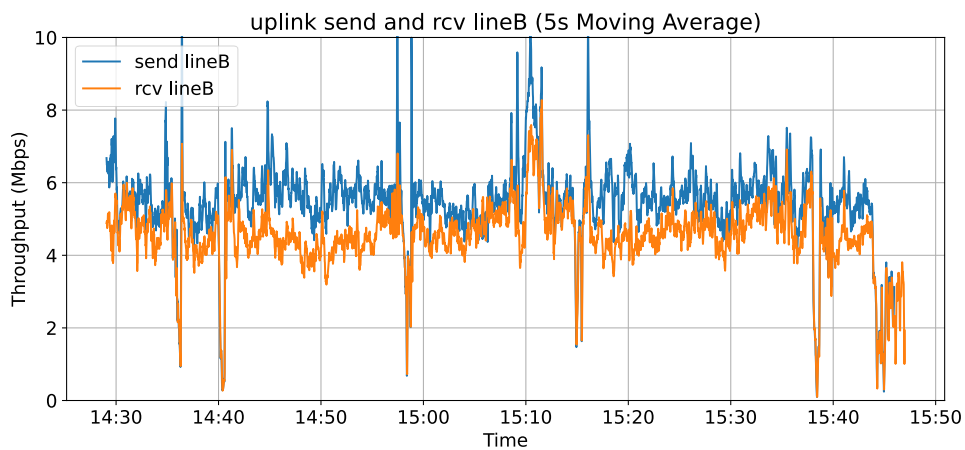
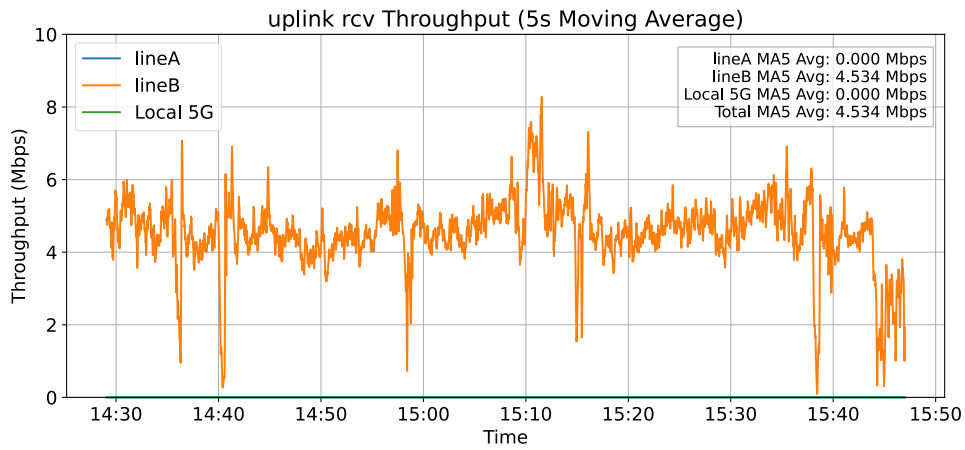
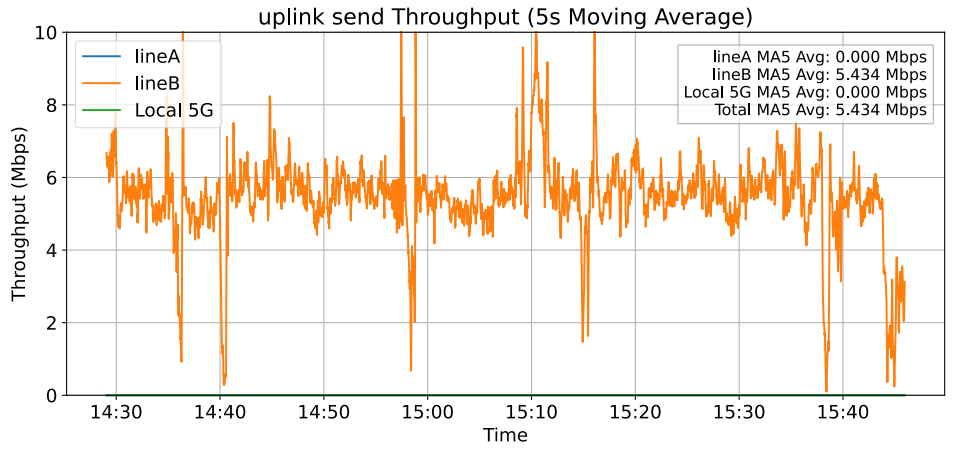
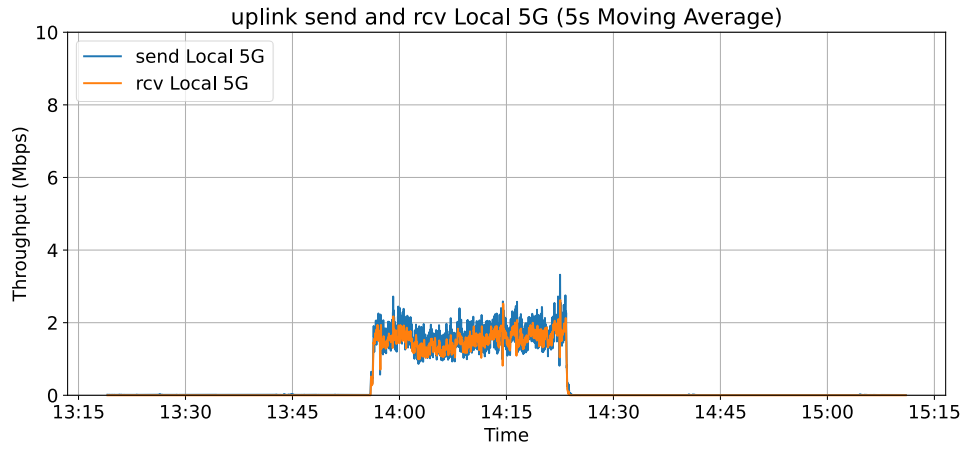


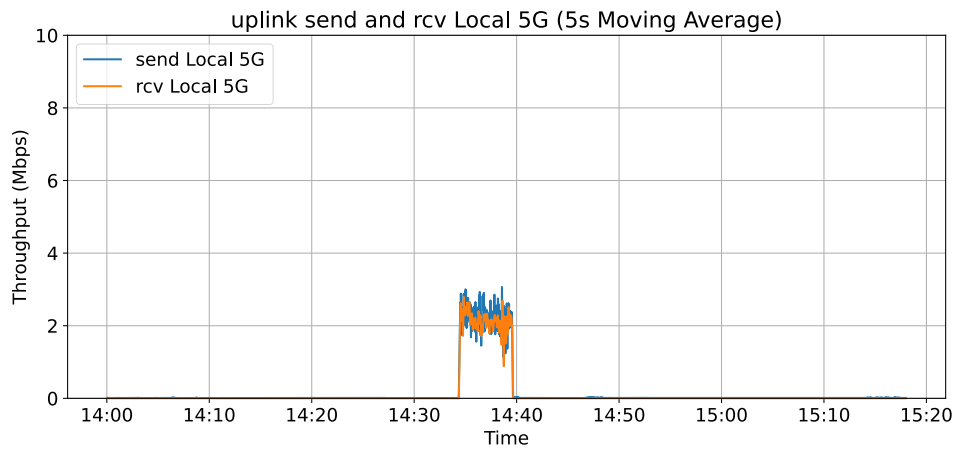
図 45 送受アップリンクスループロット時間変動(回線 B 単独)

ローカル 5G

(1) 2026.1.13 #2 (接続時のみ)



(2) 2026.1.19 #3 (接続時のみ)



(3) 2026.1.21 #3 (接続時のみ)

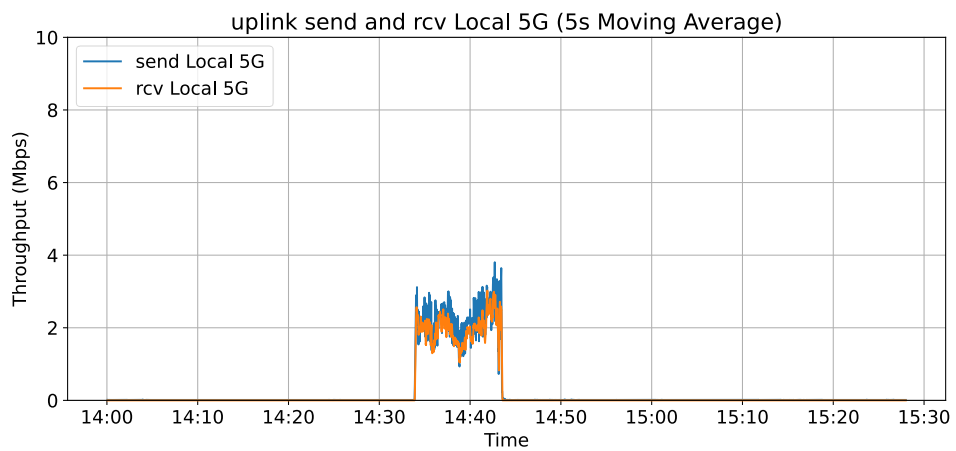
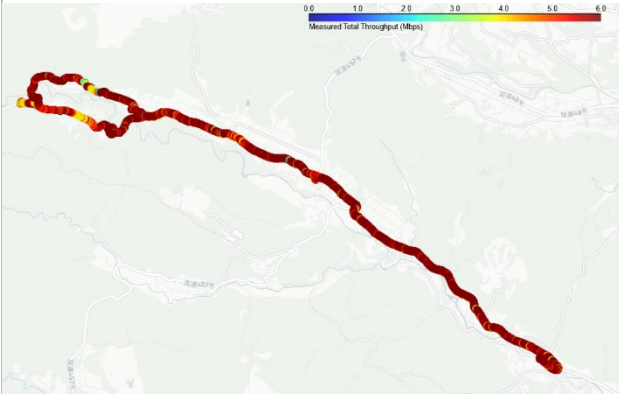


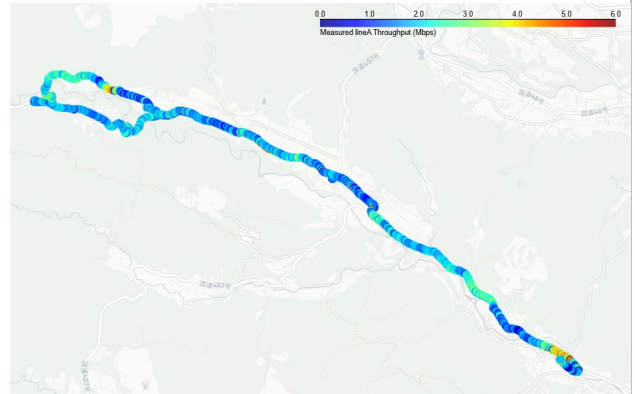
図 46 送受アップリンクスループット時間変動(ローカル 5G 単独)

3 回線統合後(2026.1.13 #2)

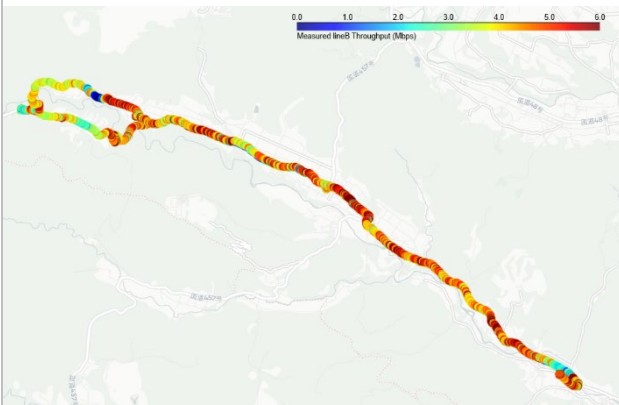
(0) 統合後



(1) 公衆網 A



(2) 公衆網 B



(3) ローカル 5G

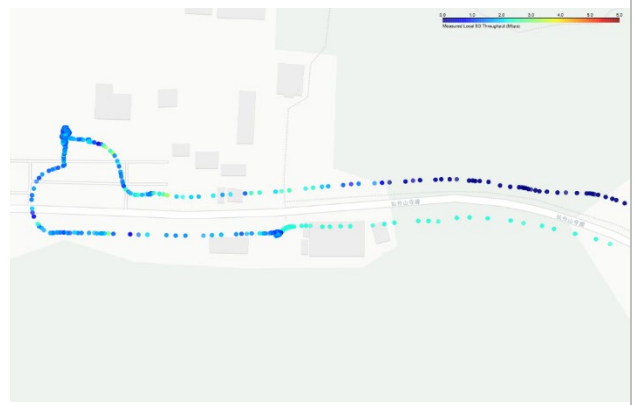
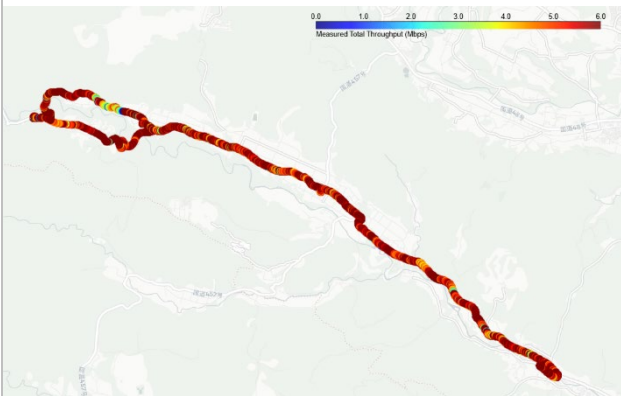


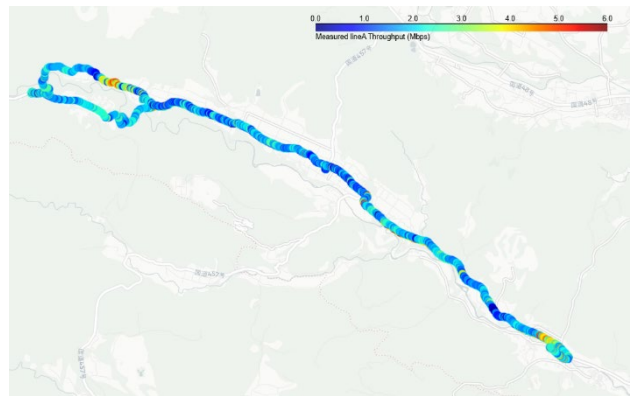
図 47 アップリンク受信スループット ヒートマップ(回線 A+B+ローカル 5G)

2 回線統合時(公衆網 A+公衆網 B) (2026.1.15 #1)

(0) 統合後



(1) 公衆網 A



(2) 公衆網 B

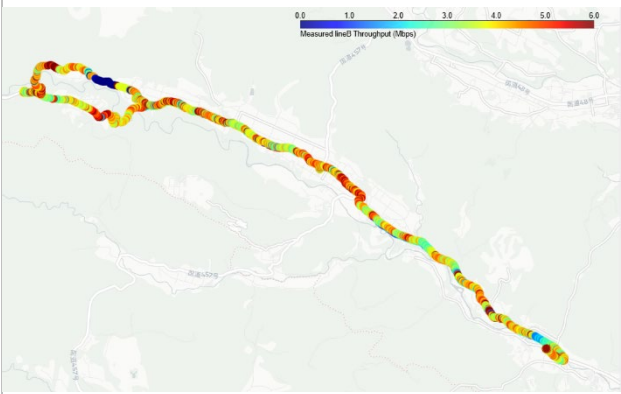


図 48 アップリンク受信スループット ヒートマップ(回線 A+B)

公衆網 A(2025.12.22)

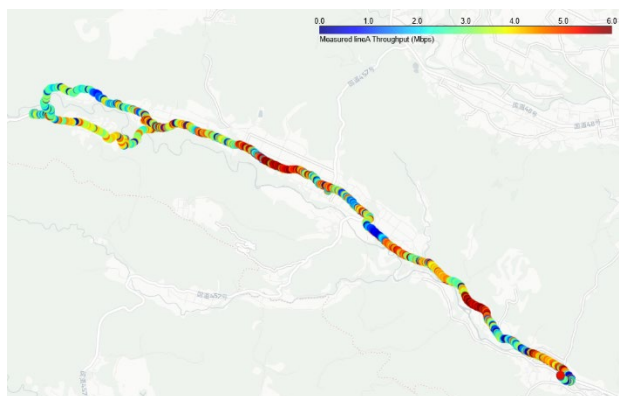


図 49 アップリンク受信スループット ヒートマップ(回線 A 単独)

公衆網 B(2025.12.25)

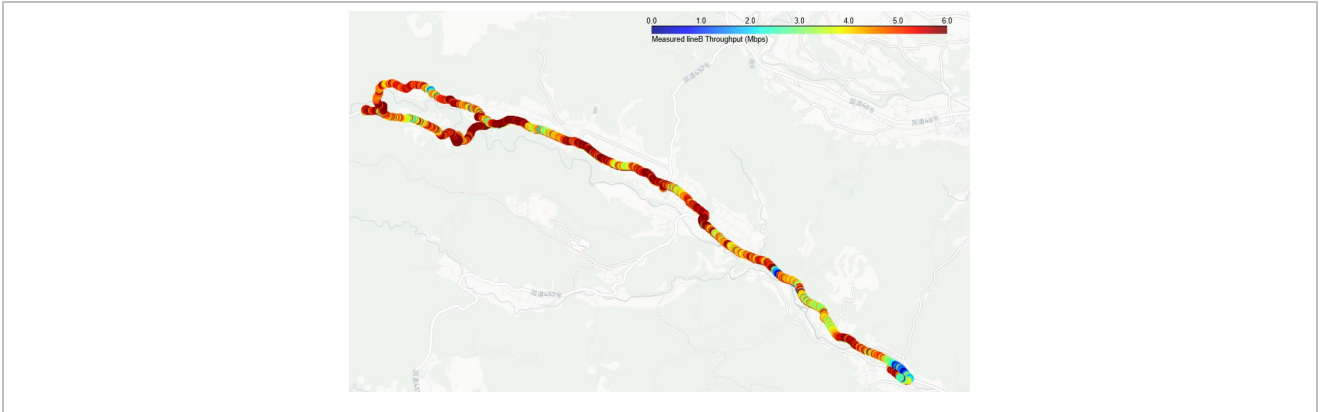


図 50 アプリリンク受信スループット ヒートマップ(回線 B 単独)

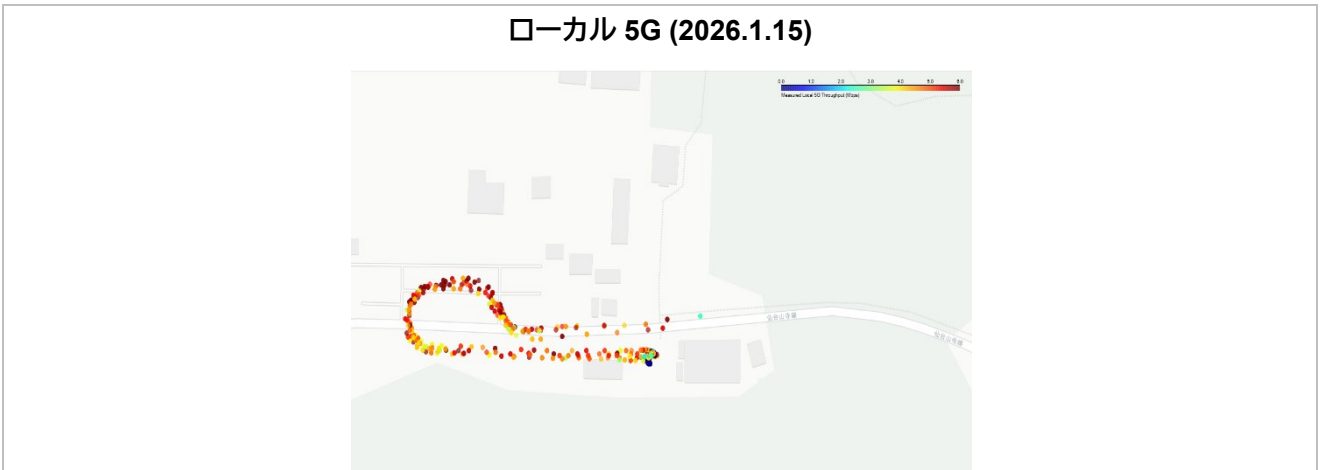
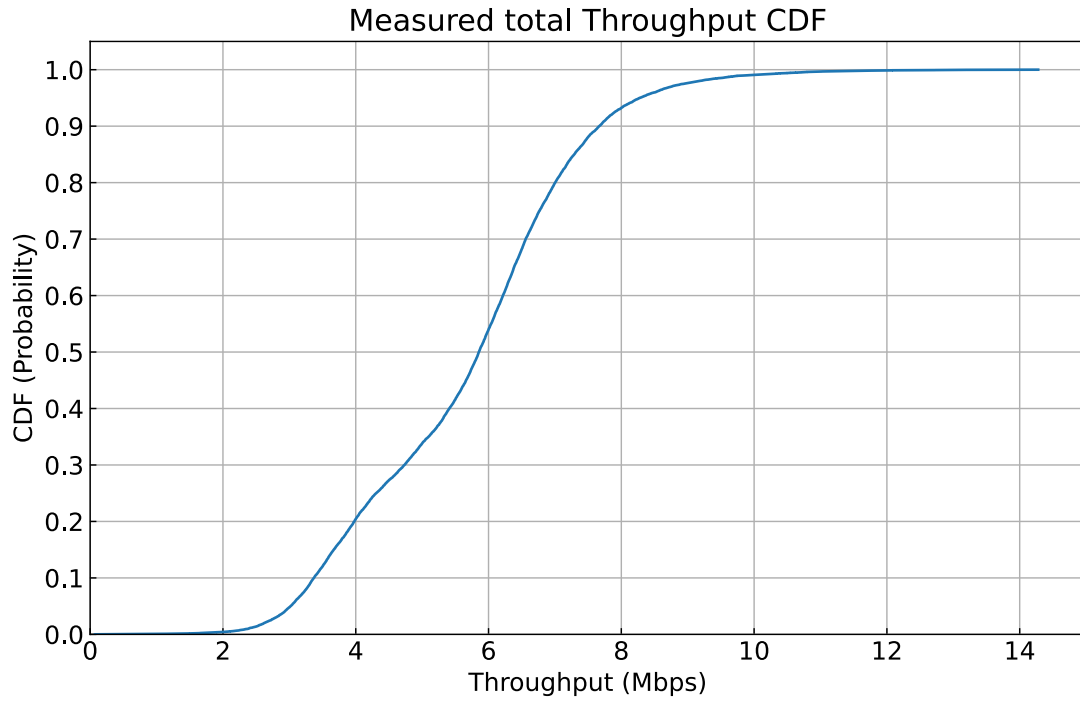


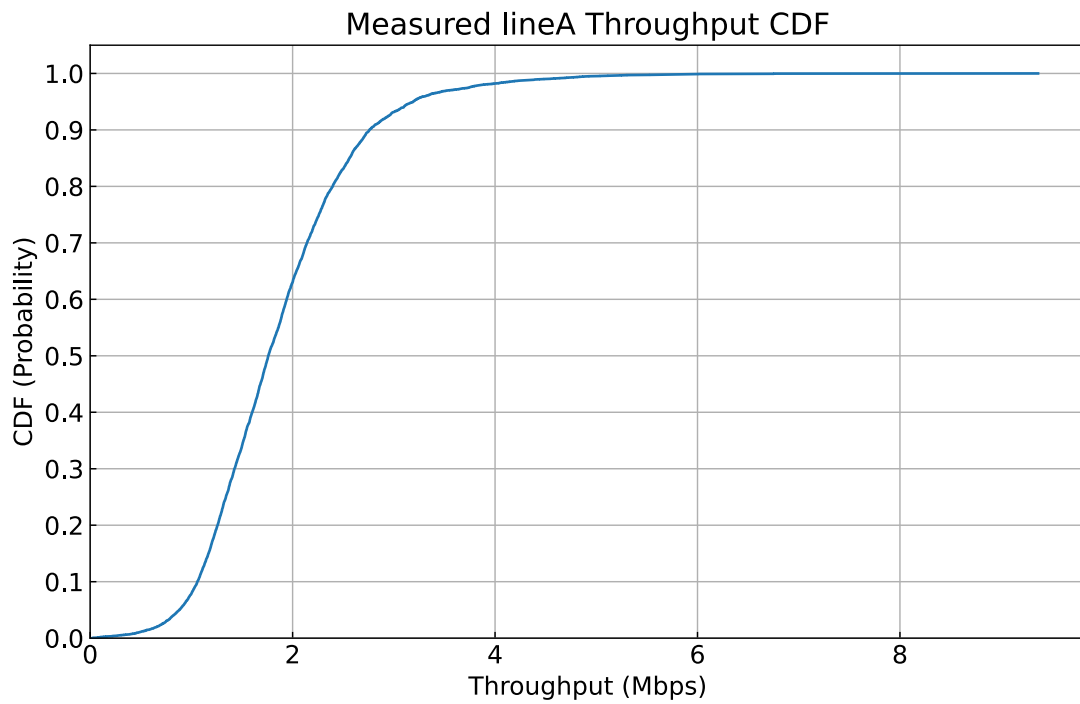
図 51 アプリリンク受信スループット ヒートマップ(ローカル 5G 単独)

(1) 2026.1.13 #2

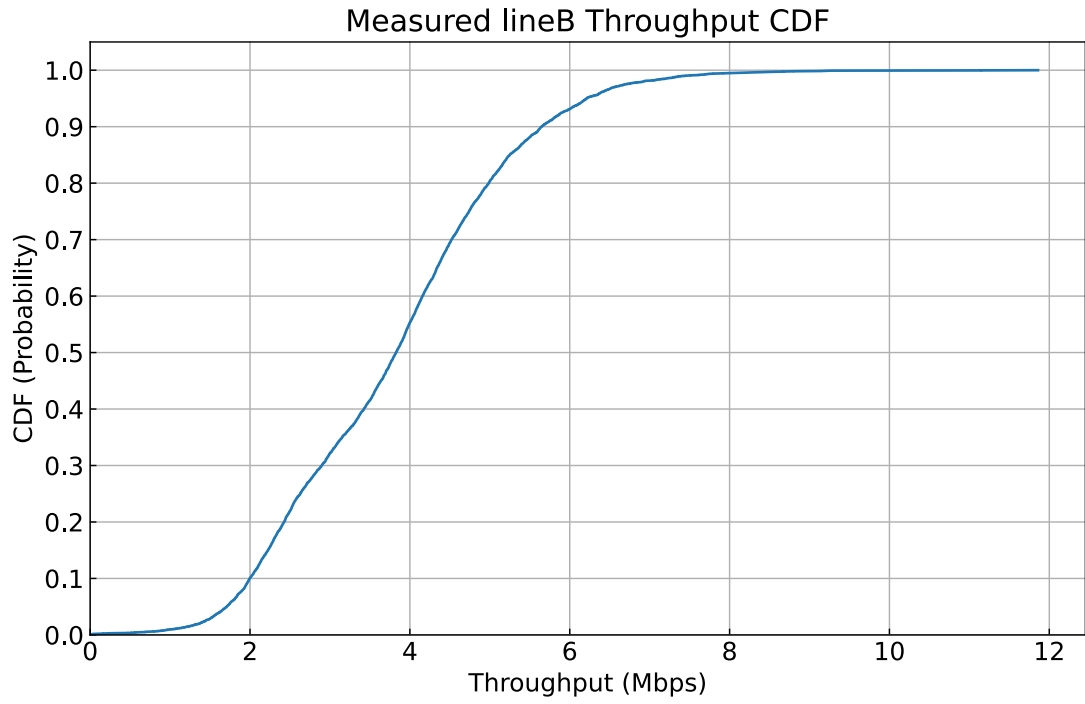
(1-0) 統合後



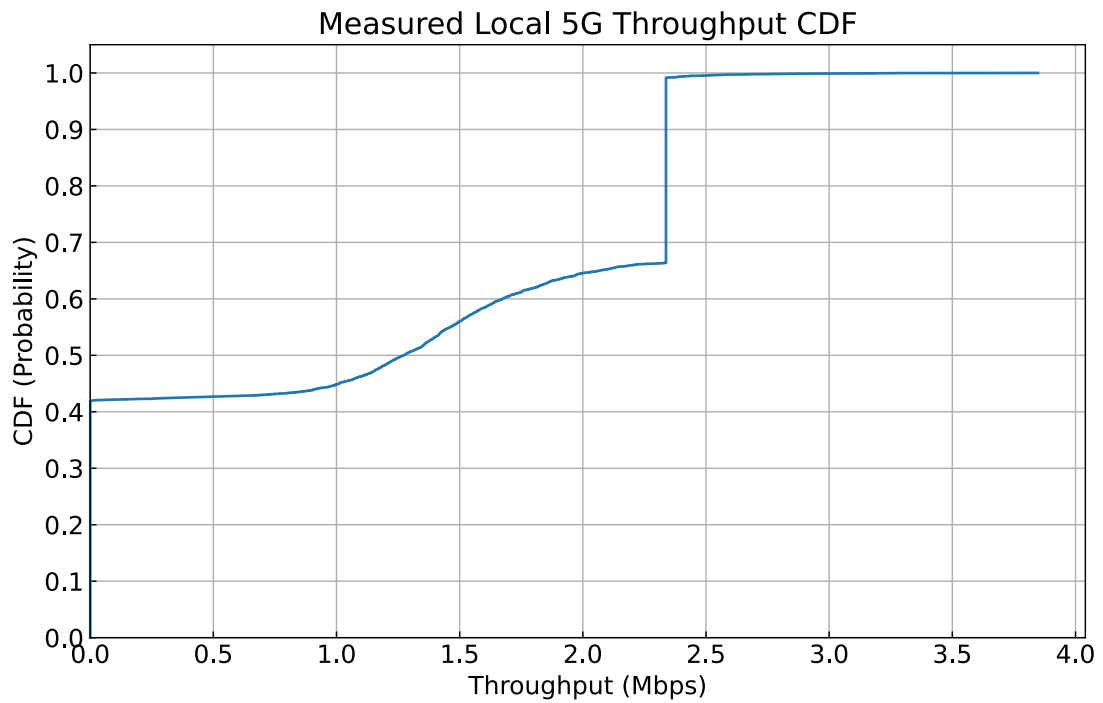
(1-1) 公衆網 A



(1-2) 公衆網 B

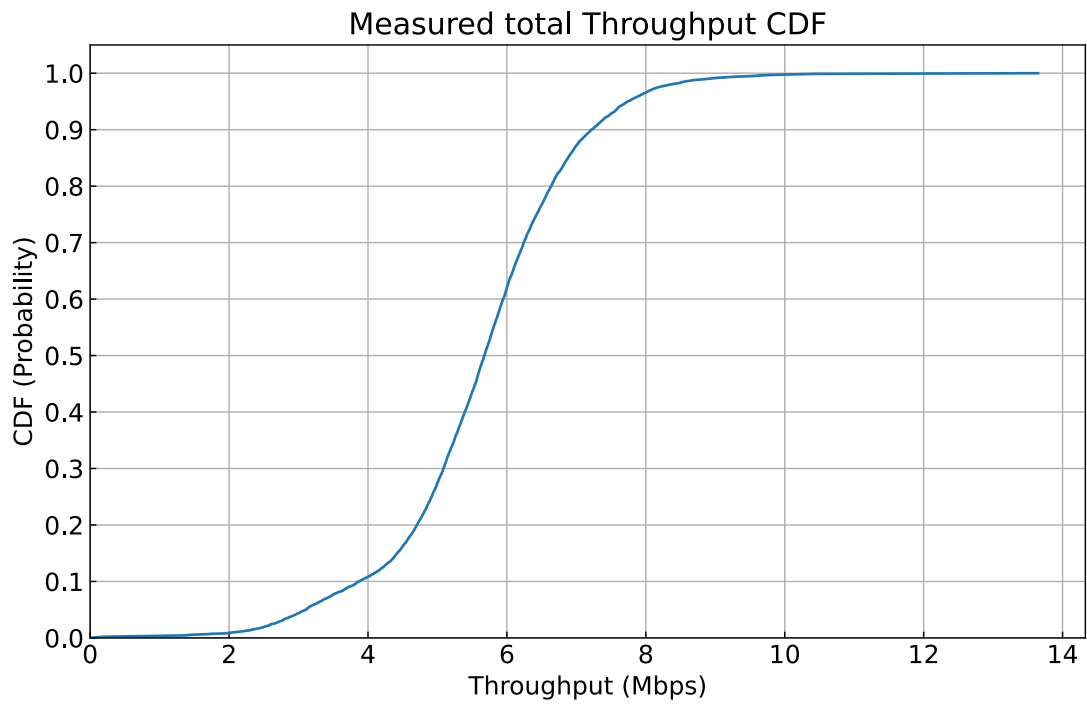


(1-3) ローカル 5G

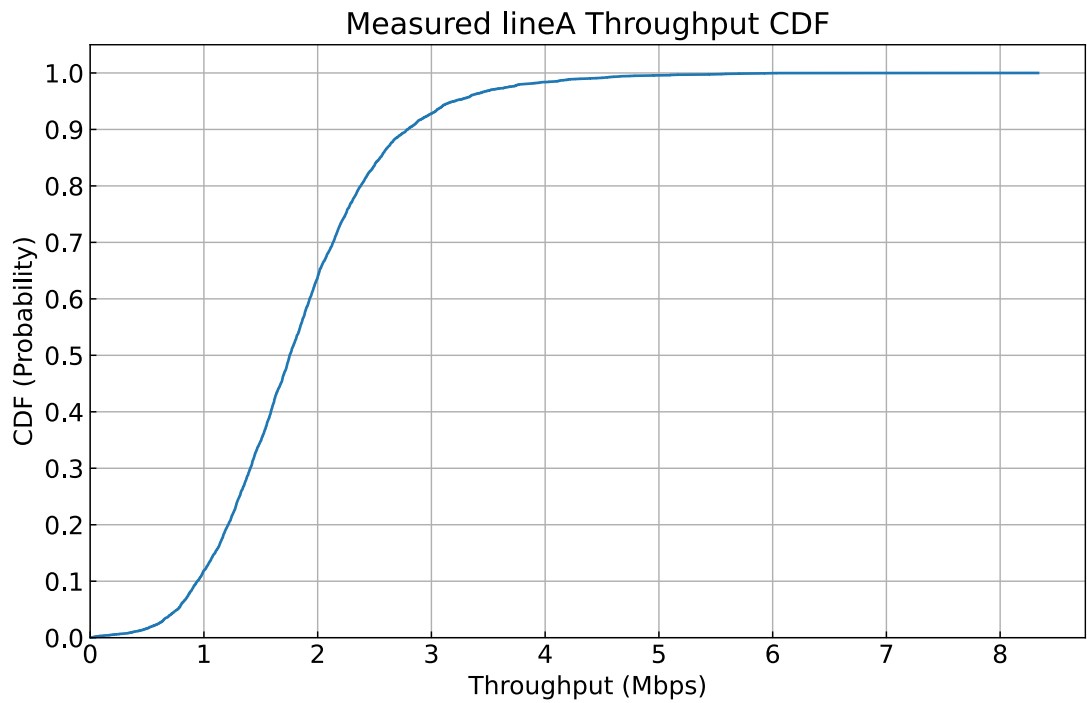


(2) 2026.1.19 #3

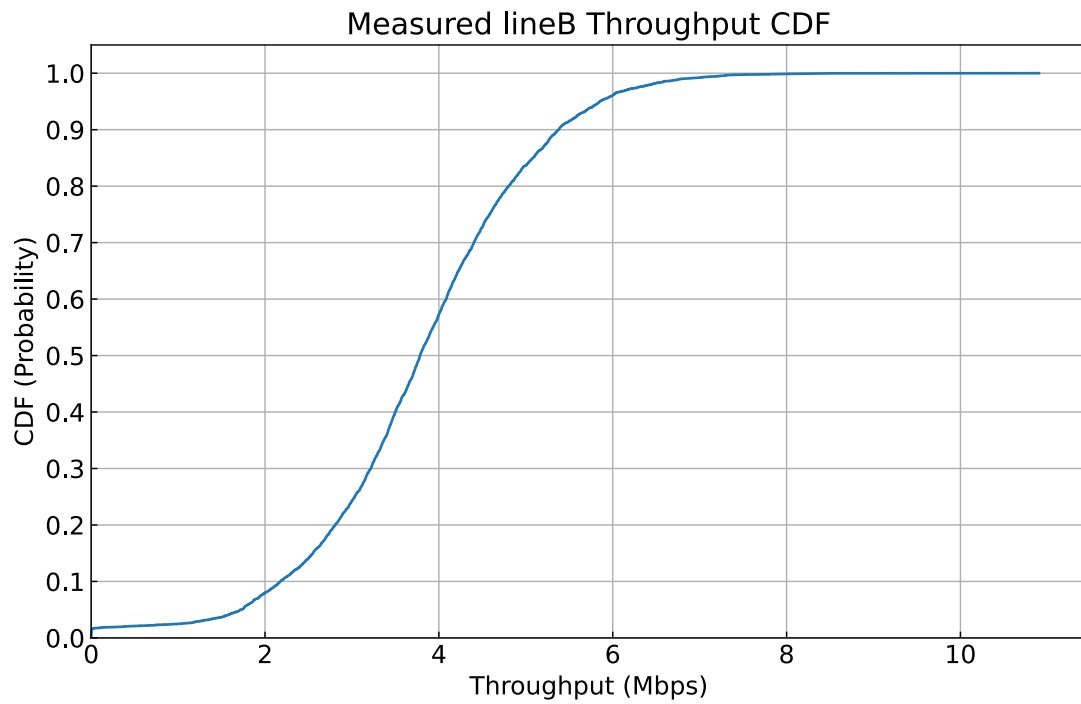
(2-0) 統合後



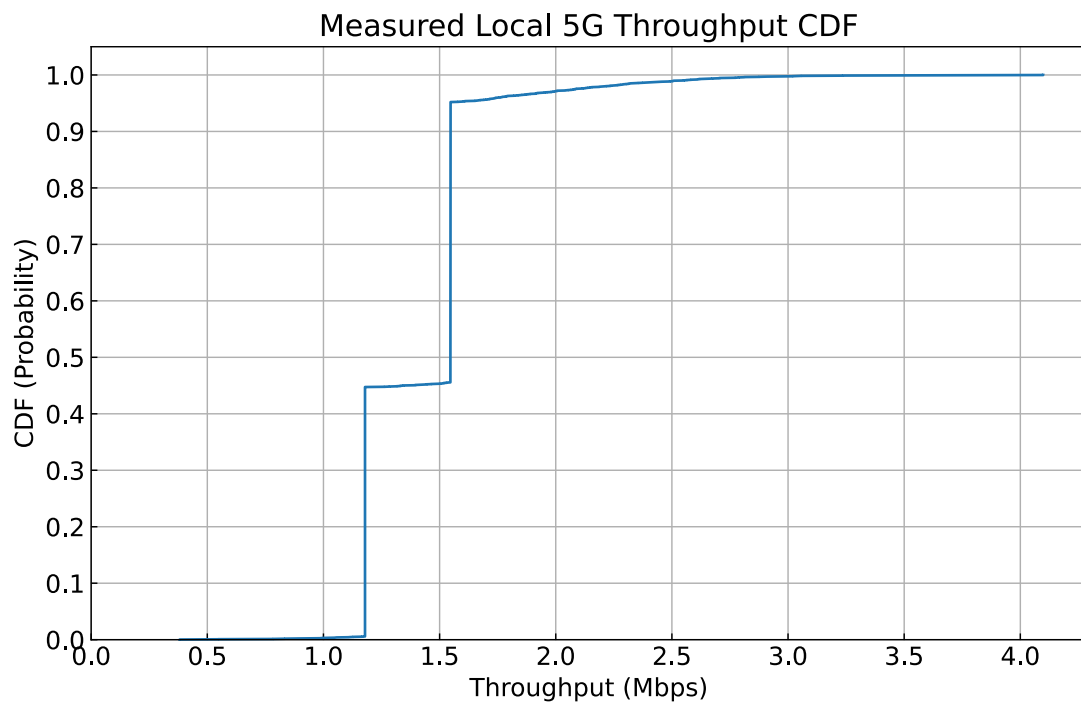
(2-1) 公衆網 A



(2-2) 公衆網 B

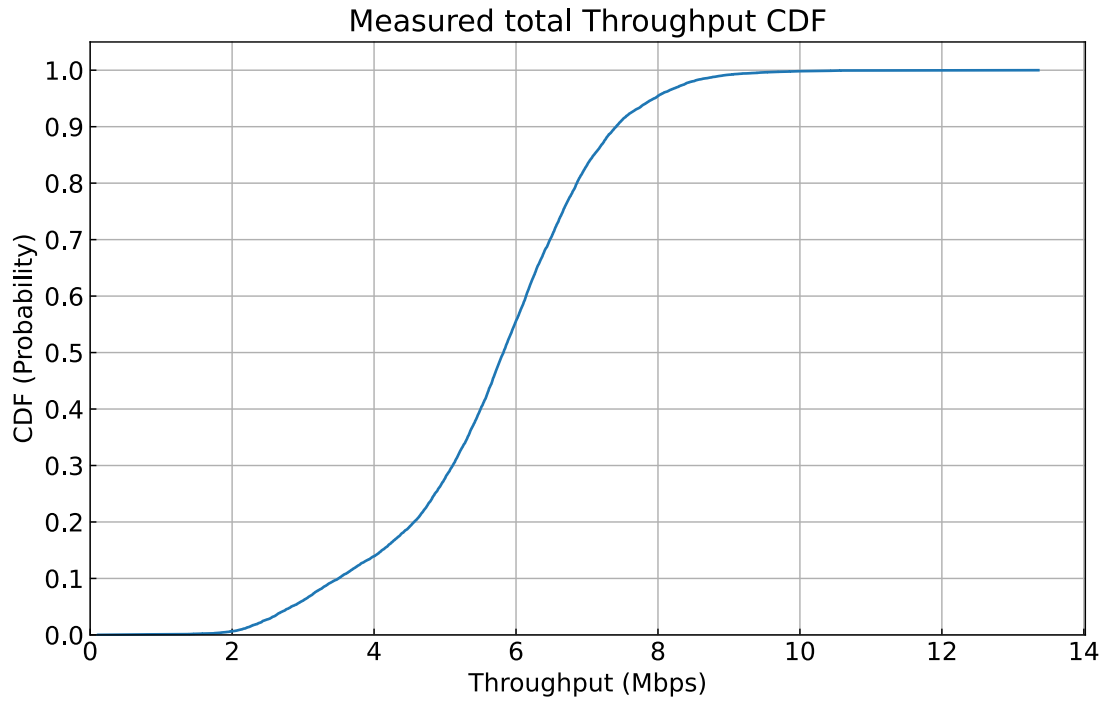


(2-3) ローカル 5G

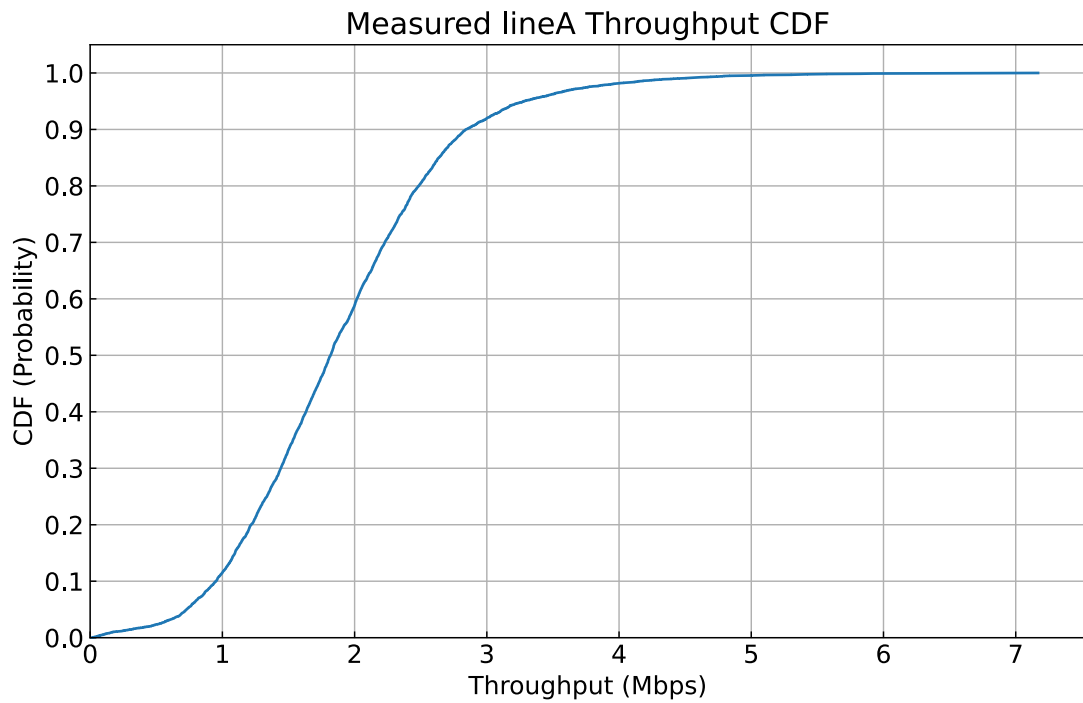


(3) 2026.1.21 #3

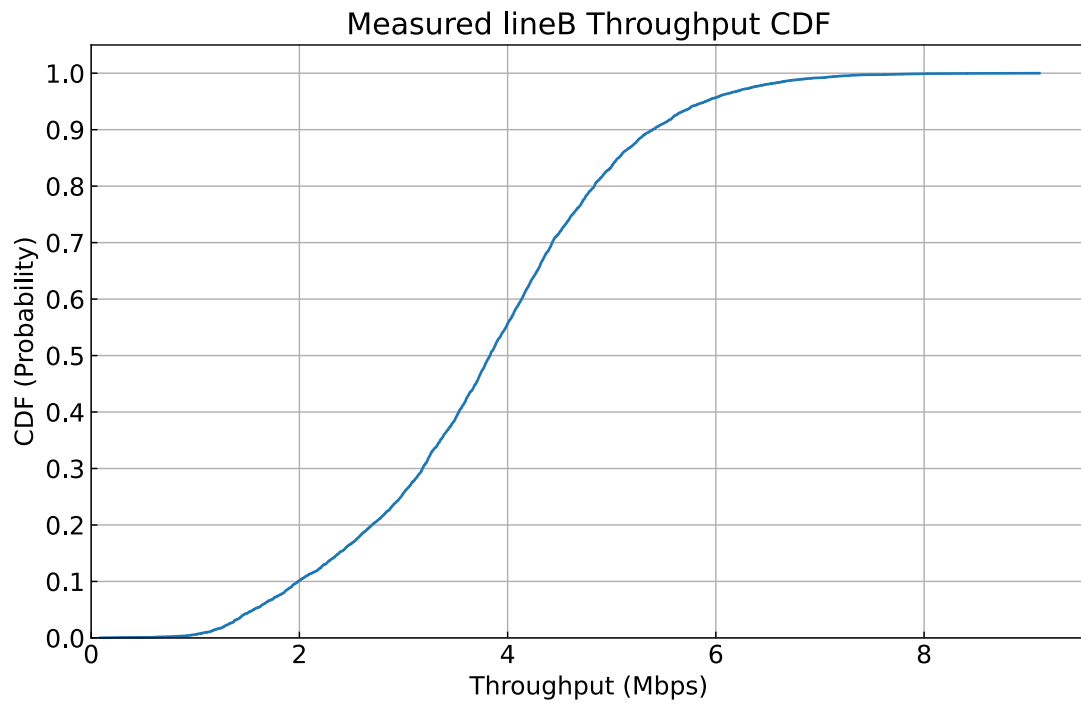
(3-0) 統合後



(3-1) 公衆網 A



(3-2) 公衆網 B



(3-3) ローカル 5G

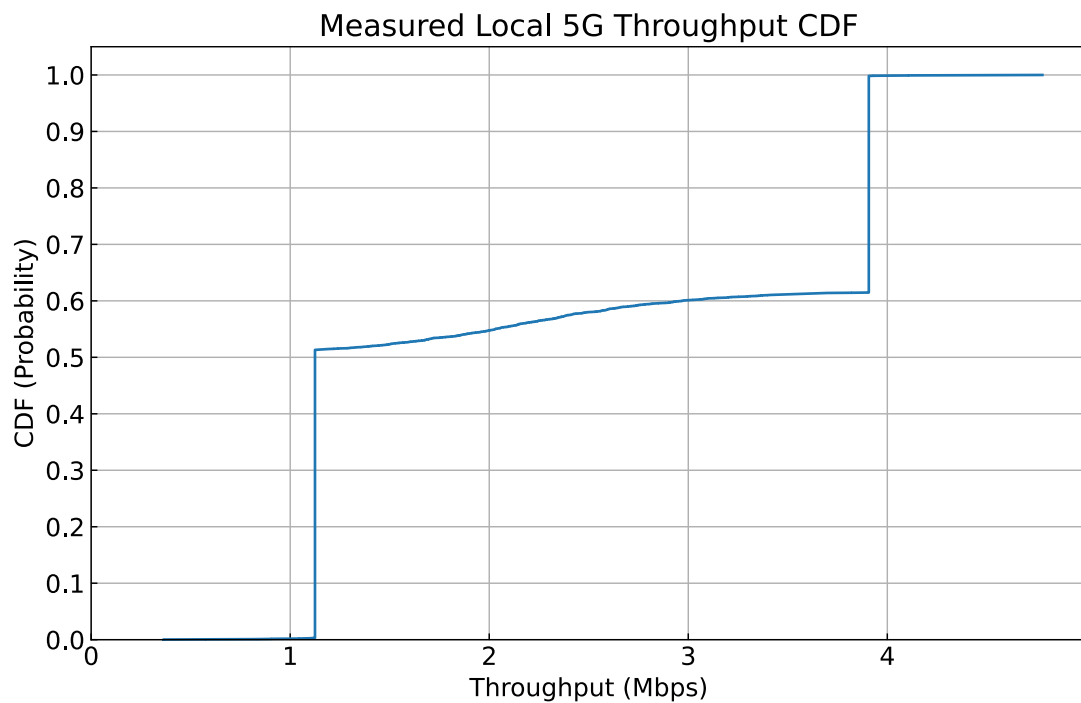
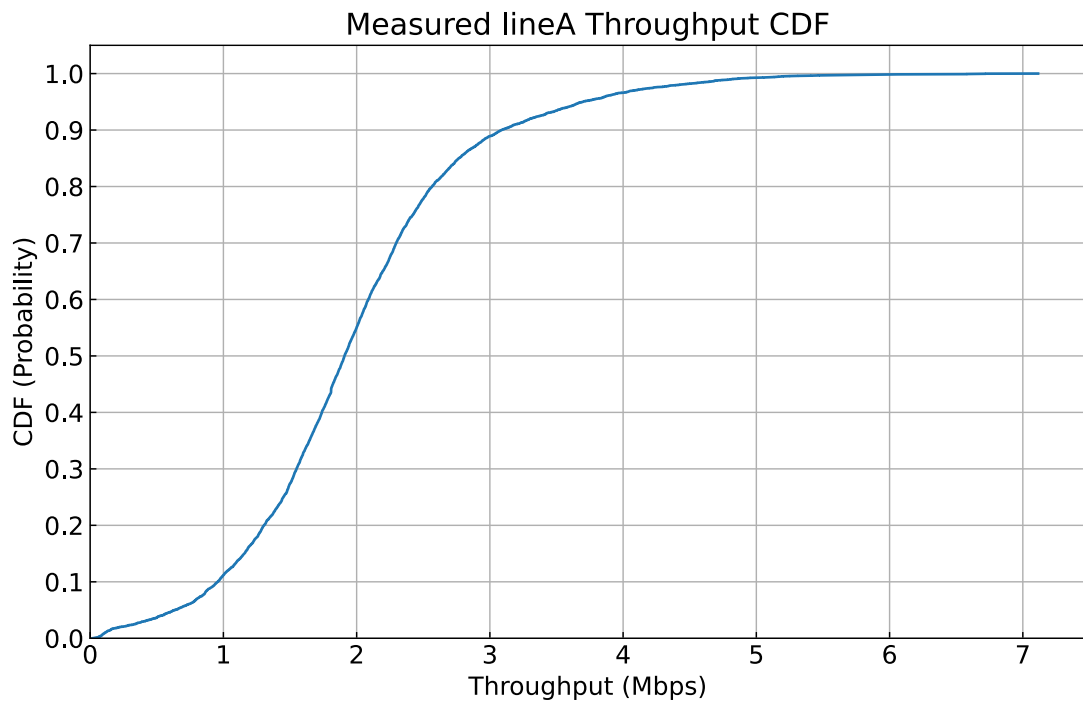
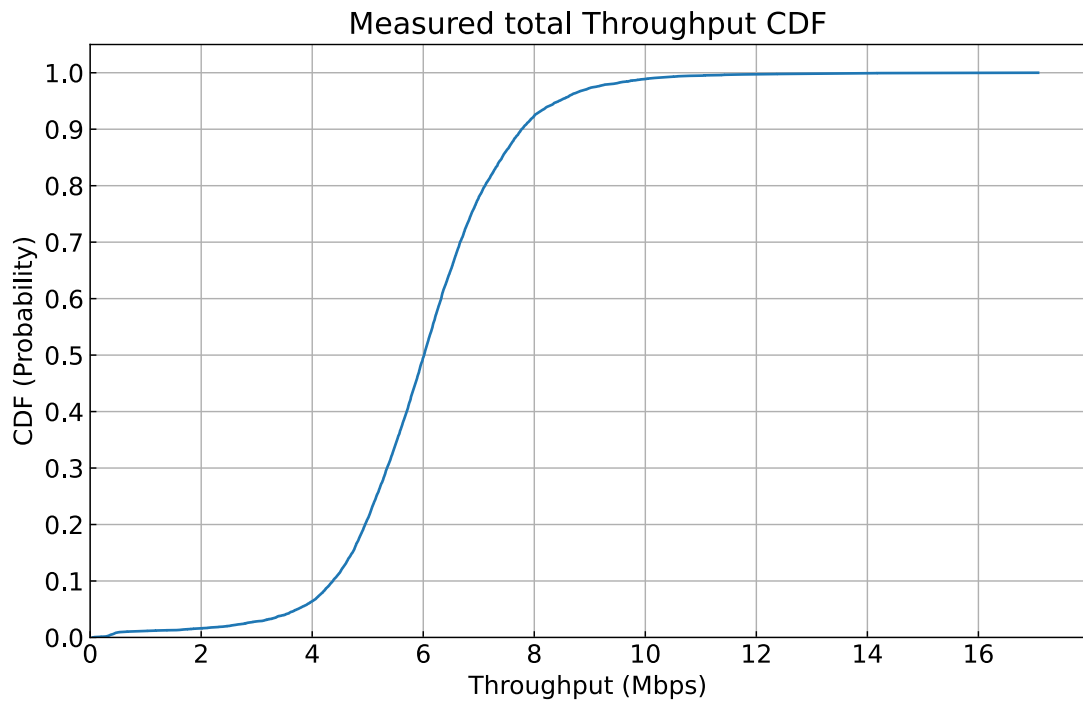


図 52 アップリンク受信スループット累積確率分布(公衆網 A+B+ローカル 5G 統合時)

2026.1.15 #1



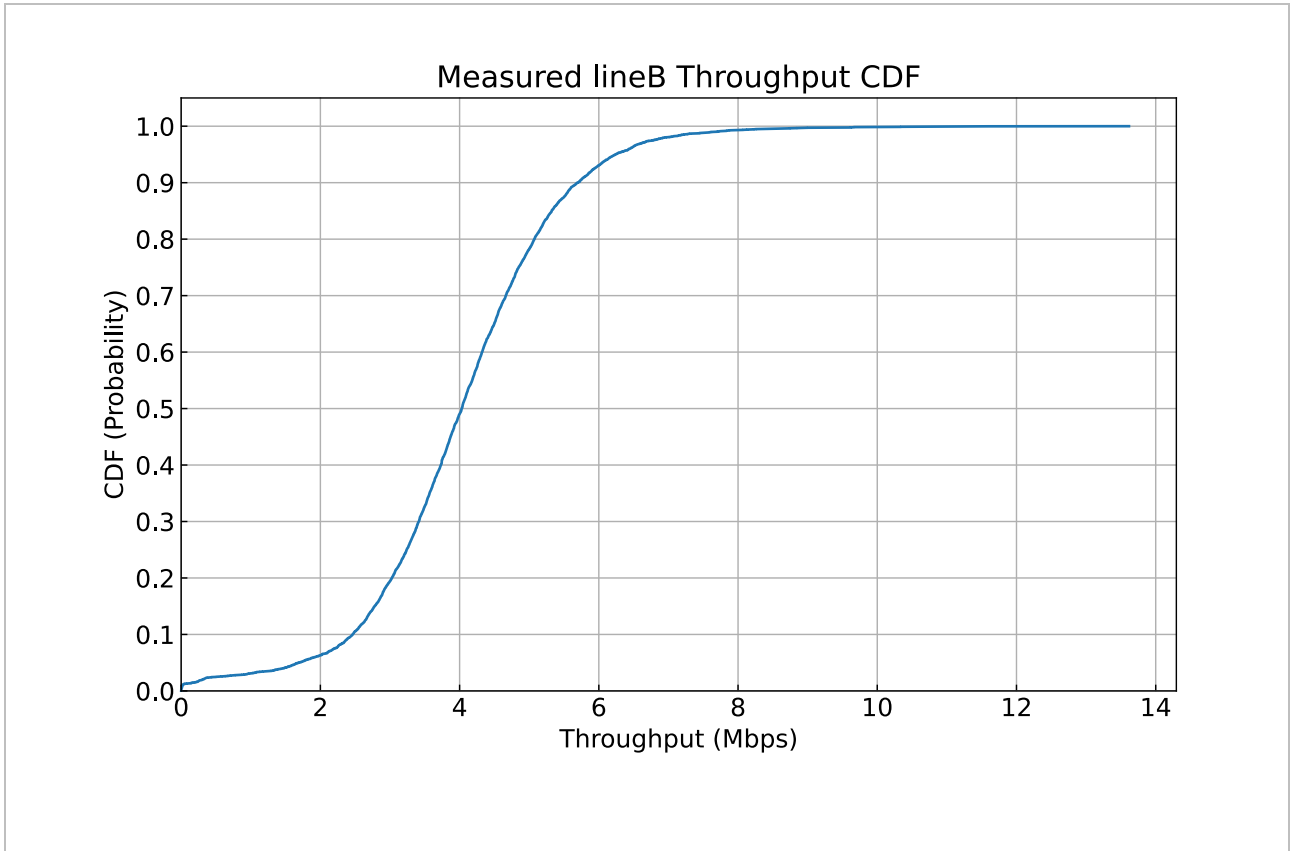


図 53 アップリンク受信スループット累積確率分布(公衆網 A+B 統合時)

2025.12.22

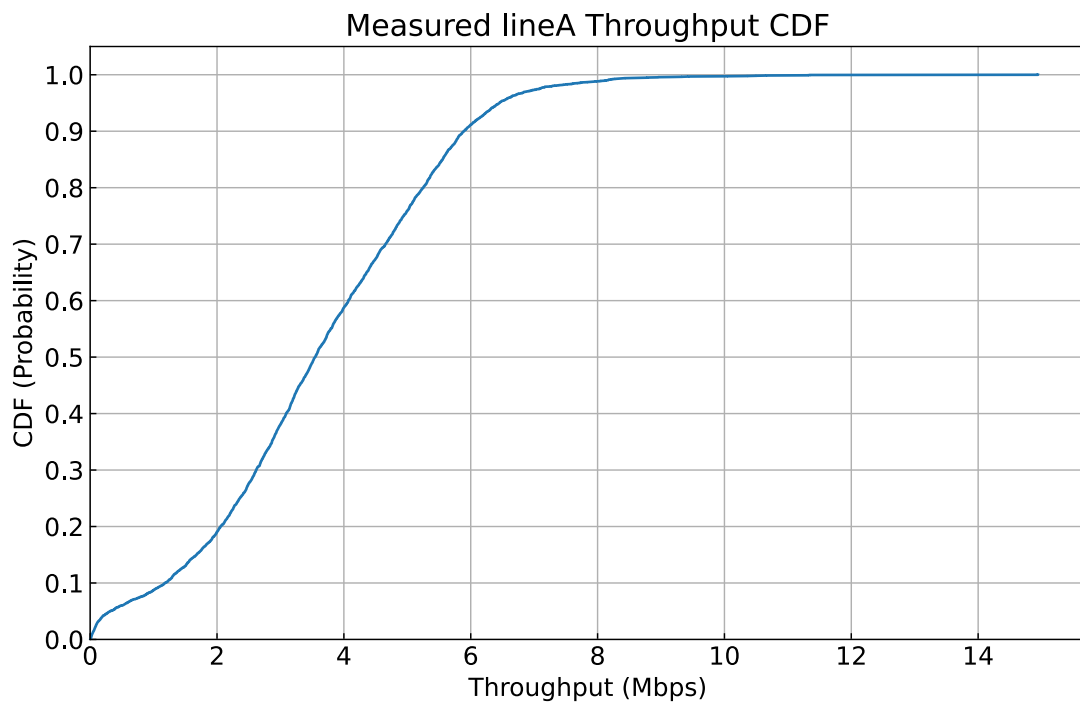


図 54 アップリンク受信スループット累積確率分布(公衆網 A 単独接続時)

2025.12.25

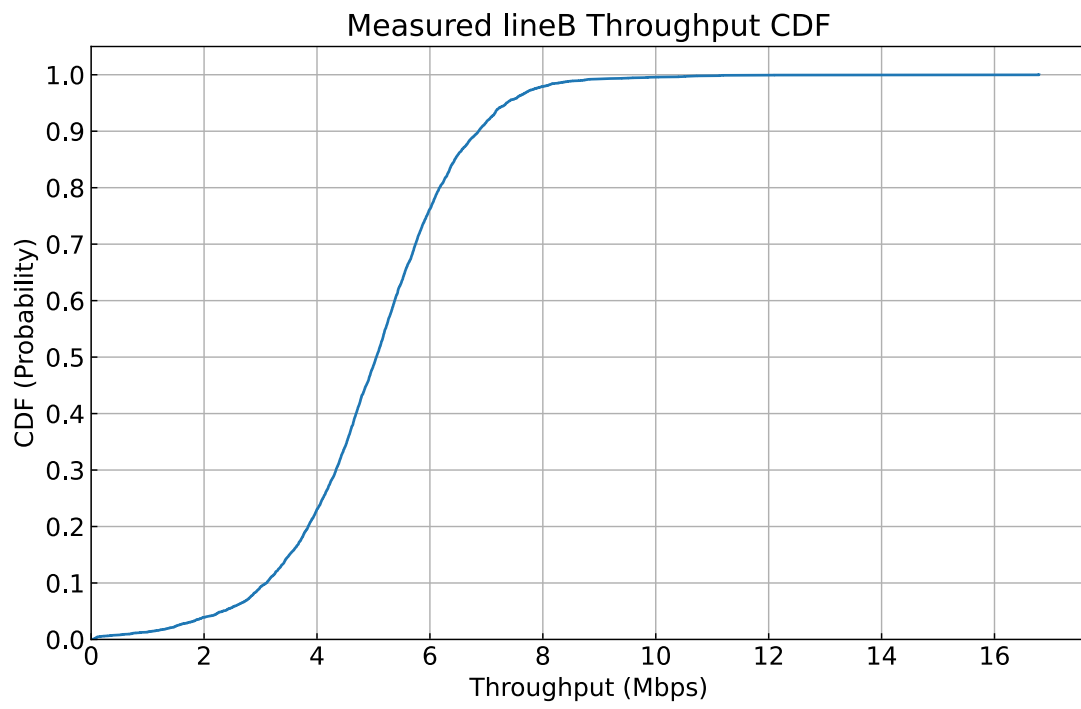
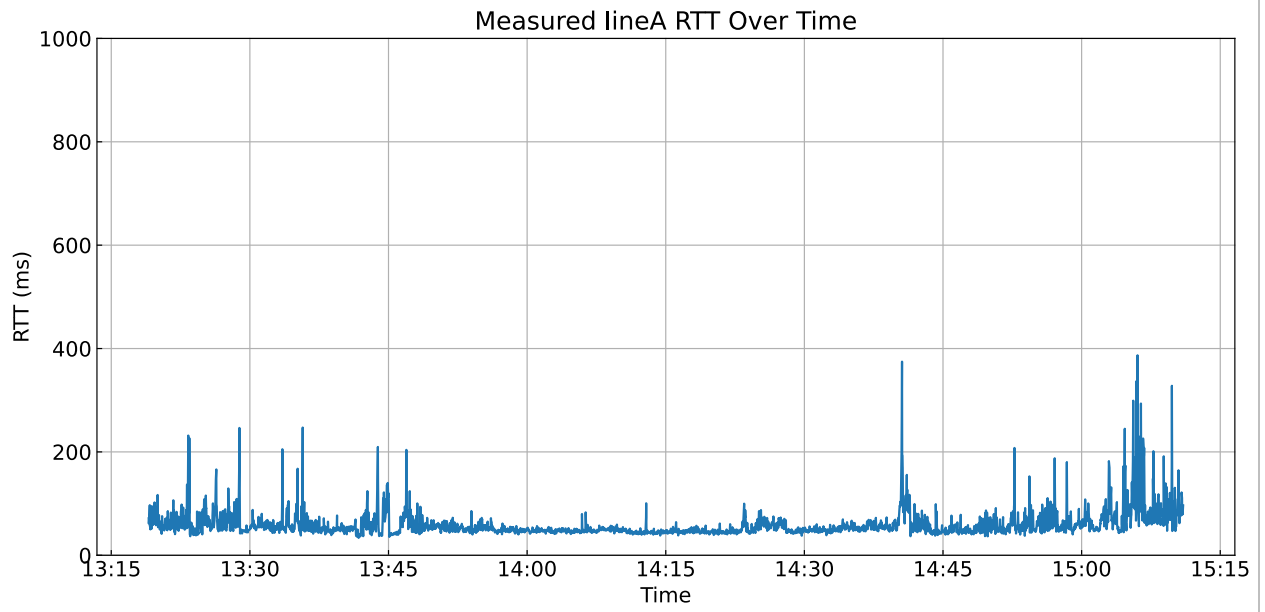


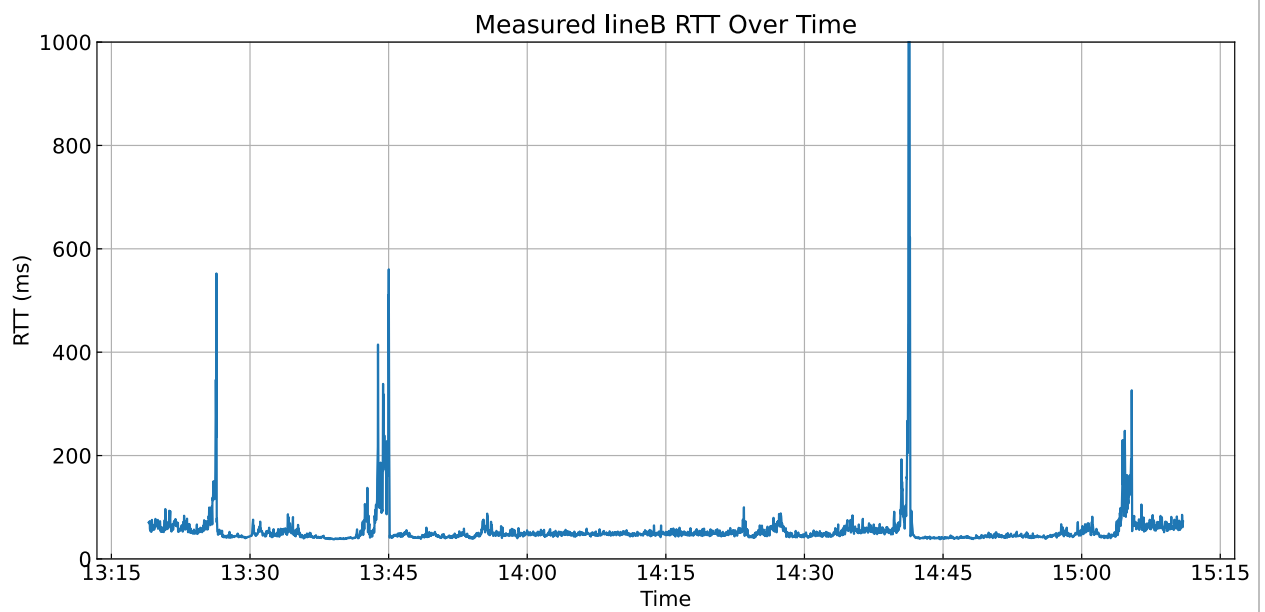
図 55 アップリンク受信スループット累積確率分布(公衆網 B 単独接続時)

2026/1/13 #2

公衆網 A



公衆網 B



ローカル 5G

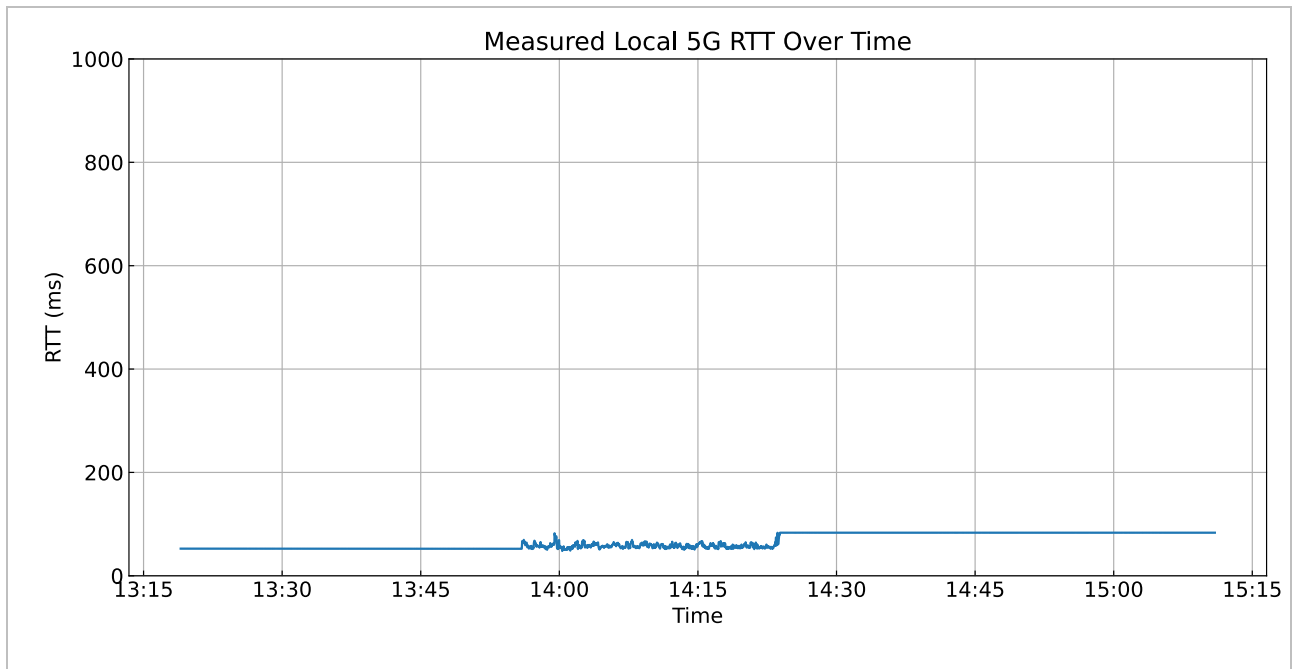


図 56 無線区間 RTT の例

3) KPI/KGI との比較結果

表 30 ユースケース②における KPI/KGI(1)

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	複数キャリアネットワークカバレッジ内で自動運転バス運行の高精細な常時映像監視、車両制御が可能であること。
定量評価	(2)	公衆網およびローカル 5G カバレッジ内でのアップリンクスループットが平均 6Mbps 以上得られること。

(1) 複数キャリアネットワークカバレッジ内で自動運転バス運行の高精細な常時映像監視、車両制御が可能であること。【定性評価】

常時映像監視および周辺状況把握が、遠隔監視業務として成立しているかを KPI と KGI の観点から確認するため、交通事業者(遠隔監視員)へのアンケートに基づく定性評価を実施した。交通事業者(遠隔監視員)2 名(n=2)へのアンケート結果から、以下の点が確認された。遠隔監視画面に表示される映像および各種情報により、走行中の車両状態や周辺状況を把握することが可能であった。実証中の遠隔監視業務において、遠隔監視映像の品質や情報表示が判断の妨げとなる場面は確認されなかった。一方、自由記述においては、遠隔監視画面における表示情報の整理、視認性や強調表示方法について改善の余地が示されており、KPI と KGI 達成の前提条件は満たしているものの、運用性向上に向けた調整余地が存在することが確認された。

【考察】

本実証における定性評価の結果より、遠隔監視員の立場からは、常時映像監視および運行状況把握

は、実証環境下において KPI と KGI で想定した水準で成立していると評価できる。また、重大な支障や安全上の懸念が確認されていないことから、KPI と KGI で設定した目的に対して、基本的な機能要件は満たしていると考えられる。

一方で、遠隔監視画面における表示方法や情報整理に関する改善意見が示されていることから、今後の実証フェーズにおいては、KPI と KGI の達成度をより安定的なものとするためのユーザインターフェースの改善が検討事項として整理された。

(2) 公衆網およびローカル 5G カバレッジ内でのアップリンクスループットが平均 6Mbps 以上得られること。【定量評価】

協調型インフラ基盤および Cradio を利用した 3 回線統合時による送受信のスループット改善が確認できた。一方で、3 回線統合時においても平均送信・受信アップリンクスループットはそれぞれ 6.3 Mbps, 5.2 Mbps であり、受信アップリンクスループットは KPI 未達となった。ただし、送信データには FEC による冗長パケットと再送パケットが含まれるため、1.1 Mbps 分の未達が直ちに映像途絶等の業務影響につながるとは言い切れない(再送や FEC によりアプリケーション上は問題がない可能性がある)。

4) 成果・課題

本実証の結果、協調型インフラ基盤および Cradio を用いることで、複数の公衆網およびローカル 5G 網をそれぞれの回線品質に応じて適応的に統合し、仮想的に一つの通信回線として遠隔監視および車両制御に利用できることを確認した。これにより、通信環境が一様でない実証ルートにおいても、常時映像監視および運行状況の把握が可能であり、KPI と KGI で想定した、高精細な遠隔監視を前提とする運行管理が成立することを、定量面と定性面の両面から確認できた。

一方で、目標として設定していたアップリンクスループットについては、一部区間において未達となった。ただし、実証ルートの多くの区間では RTT が比較的低い値で安定して推移しており、通信遅延が運行判断や監視業務に与える影響は限定的であった。このため、送信ビットレートの設定を全体的に高める運用調整を行うことで、平均 6Mbps 程度のスループットを安定的に達成できる可能性があると考えられる。遠隔監視員を対象としたアンケートによる定性評価においては、映像品質や情報取得の観点から、運行判断に支障をきたす事象は確認されなかった一方で、通信品質の変動を前提とした映像表示の最適化や、情報提示方法の改善については、今後の運用を見据えた課題として整理された。

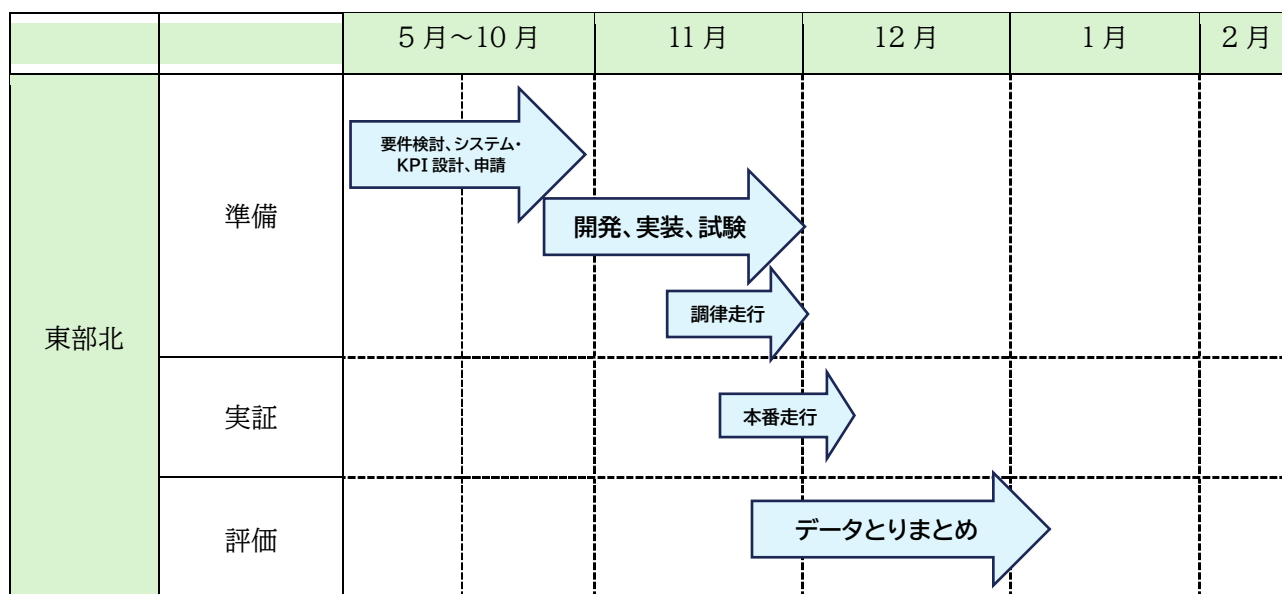
以上より、本実証では、協調型インフラ基盤×Cradio による複数回線統合の有効性は確認できた一方で、スループット目標の安定的達成に向けた運用面での最適化が今後の課題であると整理できる。

6.2.2 スライシングによる通信リソース効率化の検証

1) 実証スケジュール

表 31 ユースケース②における実証スケジュール

ルート	フェーズ	2025 年	2026 年
-----	------	--------	--------



2) 開発・評価項目の結果

表 32 ユースケース②における開発・評価項目(2)

番号	開発・評価項目
(1)	常時映像監視と車両制御の精度に対する主観評価
(2)	白杖検知に関する主観評価と課題・改善点の抽出
(3)	スライディング有り無しの場合のスループット測定
(4)	スライディング技術を使用し、輻輳環境でも自動運転車両制御に必要なデータの受信
(5)	白杖検知成功率 90%以上

(1) 常時映像監視と車両制御の精度に対する主観評価

常時映像監視および車両制御の精度について、一般試乗者および関係者を対象としたアンケートを用いて主観評価を行った。

まず、一般試乗者を対象としたアンケート(有効回答者数 n=108)では、遠隔監視や走行挙動の安全性に関する設問で「良好」の回答が多数を占めた。具体的には、以下に述べる。

遠隔監視については、乗車時の安心感に繋がるかを問う設問(図 57)で 101 名(約 94%)の回答者が肯定的な回答を示し、遠隔監視室の見学の際に印象に残った技術を問う設問(図 58)では、「途切れにくい通信」の回答者が 34 名(約 31%)、「災害・工事情報の受信」の回答者が 40 名(約 37%)存在し、乗客の心理的安全性やそれを支える技術として、常時遠隔監視の必要性が改めて確認された。

車両制御においては、走行ルート変更時の不自然な挙動や不安を感じる動きを問う設問に関して、災

害シナリオ時は約 86%以上(図 59～図 61)、工事区画回避シナリオ時は約 83%以上(図 66)の回答者が「良好」と回答した。それぞれ全体としての満足度を問う設問(図 65)では、災害シナリオ時は約 86%の回答者が「良好」と回答し、工事区画回避シナリオ時では約 94%の回答者が「良好」と回答した。以上の結果から、実証内容に対して一般試乗者からは高い満足度が示された。自由記述では肯定的な意見が多かったものの、災害シナリオ時は「津波警報の際等、法定速度での自動走行には不安がある」「ブレーキがきつく感じた」といった旨の改善点に関する回答も見られた。工事区画回避シナリオ時には、「渋滞時でも対応できるか気になる」「ブレーキがきつく感じた」といった旨の改善点に関する回答が見られた。各設問の回答者数の結果を以下に示す。(図 57～図 66)

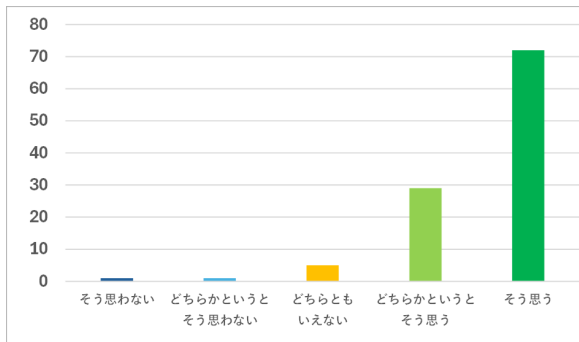


図 57 乗車時の安心感に繋がるかを問う設問

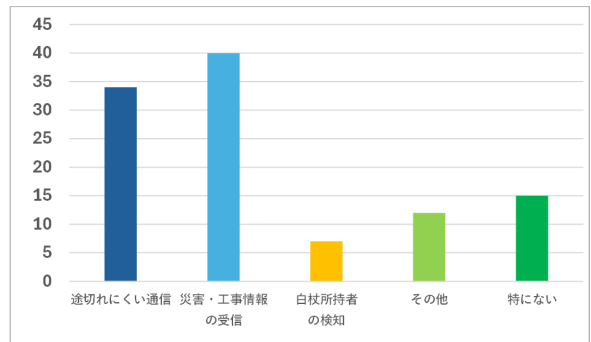


図 58 遠隔監視室の見学の際に印象に残った技術を問う設問

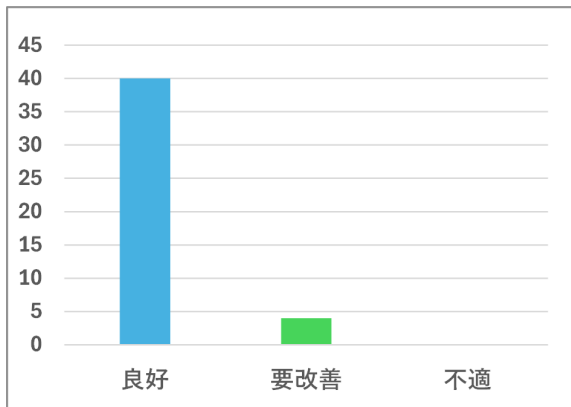


図 59 走行ルート変更時の安定性を問う設問

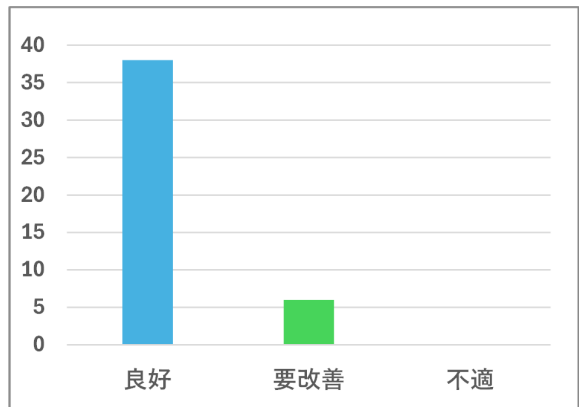


図 60 走行ルート変更時の急な揺れや不安定な動きを問う設問

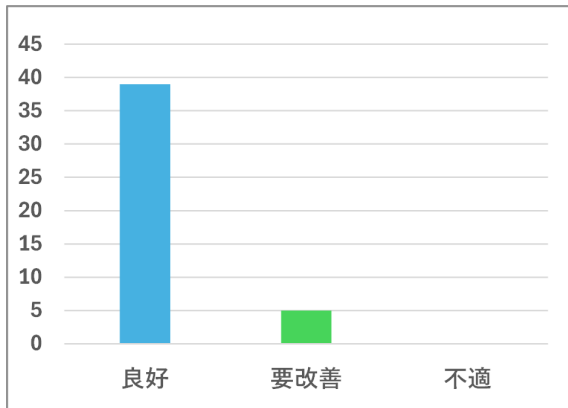


図 61 走行ルート変更後の走行の安全性を問う設問

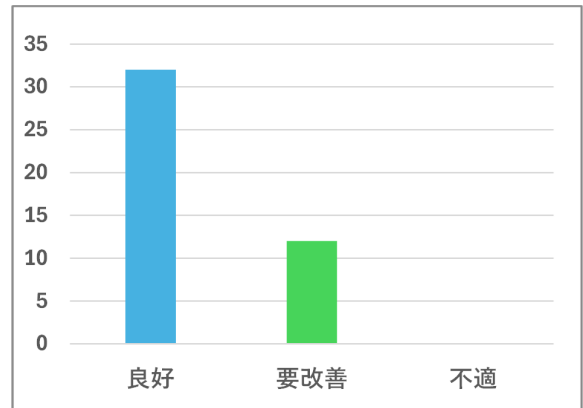


図 62 緊急時でも安心して乗車できたかを問う設問

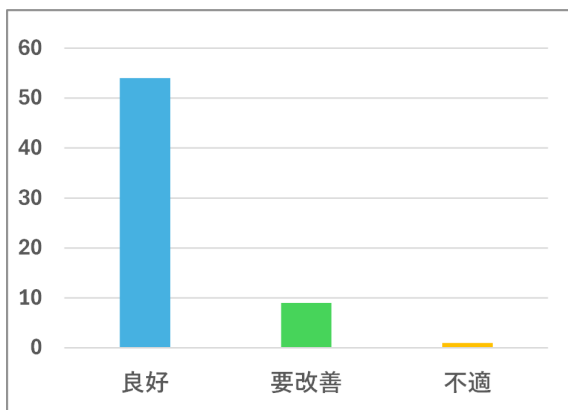


図 63 車線変更時の安定性を問う設問

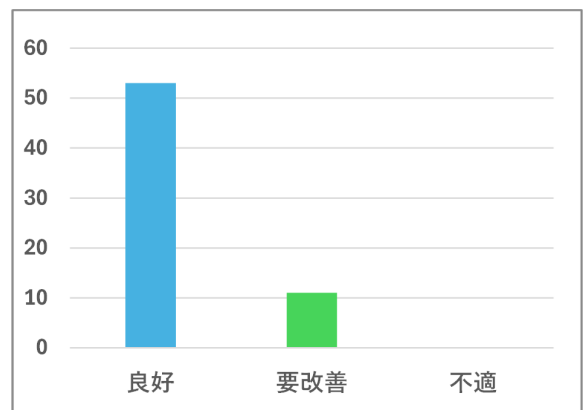


図 64 車線変更時の急な揺れや不安な動きを問う設問

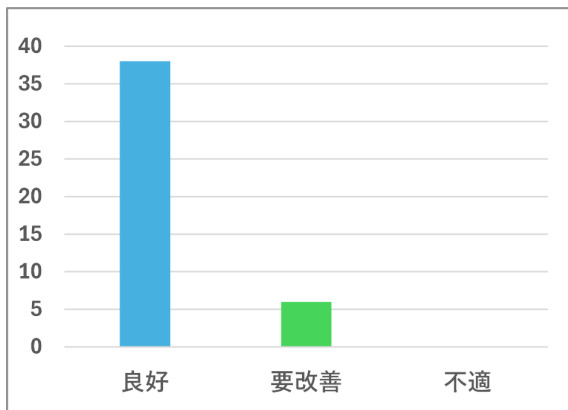


図 65 災害シナリオ時、全体的な安全性を問う設問

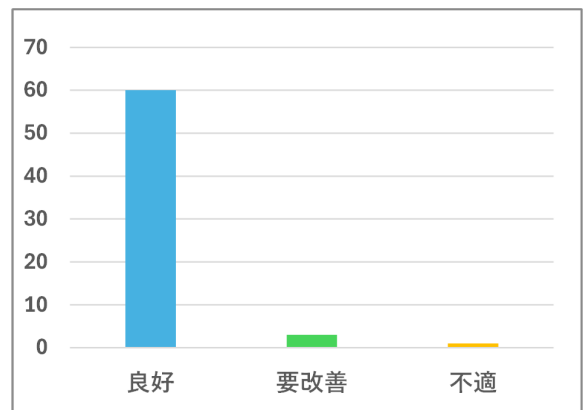


図 66 工事区画回避シナリオ時、全体的な安全性を問う設問

関係者(運転士・遠隔監視員)向けのアンケート(有効回答者数 n=6)では、遠隔監視映像の解像度や明るさ・コントラスト、視認性について半数以上が「良好」と回答し、全体的な映像品質に関しても4名(67%)が「良好」と回答した。一方で、映像の途切れ・ノイズについては3名(約50%)が「要改善」と回答しており、「特定箇所でフリーズする」「映像が停止する時間がある」等の意見が得られた。視野角については「前方のカメラ位置が高く、車両前方が確認しづらい」といった旨の映像用カメラの設置方法に関する改善要望も確認された。

車両制御については、操作性や挙動の妥当性に関して「良好」の回答が約半数を占めたものの、約半数の回答者からは改善点に関する意見がみられた。災害シナリオ時には、「車線変更時のハンド

ルのブレが気になった」「減速時のブレーキが強い」等の改善点に関する意見がみられ、制御の滑らかさに関する改善余地が示された。工事区画回避シナリオ時については、「青信号時の発進がもたついた」「並行車後続車がいる場合は乗務員による安全確認や手動介入が必要だった」といった旨の改善点に関する意見が見られた。

総じて、常時映像監視の視認性および車両制御精度は、試乗者から高い評価を得たものの、関係者を対象としたアンケートからは、映像途切れや視野角、制動挙動の滑らかさ等、運用高度化に向けた改善事項が明らかとなった。

(2) 白杖検知に関する主観評価と課題・改善点の抽出

白杖検知機能に関する主観評価では、一般試乗者を対象としたアンケートおよび遠隔監視員と運転士を対象としたアンケートにおける白杖関連の設問をもとに整理した。一般試乗者を対象としたアンケートでは、白杖検知が安心感向上に寄与するかを問う設問(図 67)に対し、秋保ルートと東部北ルートでの回答(有効回答者数 n=263)において、「そう思う」128 名(約 49%)、「ややそう思う」82 名(約 31%) と、計210名(約 80%) が肯定的に回答した。

また、運転士を対象としたアンケートでは、白杖検知に直接対応する項目として「ダッシュボード表示の分かりやすさ」が該当し、5 名中 4 名(約 80%)が『良好』、1 名(20%)が『要改善』と回答した。良好回答では「慣れれば理解しやすく安心して確認できた」との声があり、概ね「検知が運行判断の補助として有効」との実務的評価が得られた。

一方で課題として、表示の可視性不足が挙げられる。運転士や遠隔監視員等の関係者側からも「アイコンに強調性が足りない」との意見があり、直感的に分かるインターフェース設計が求められる。

総合すると、白杖検知は乗客の安心感向上に大きく寄与し、運転士も情報取得の実務上の支障は少ないと評価している。しかし、検知イベントの見える化、検知後挙動の対応方針の具体化が社会実装段階で重要であると想定できる。

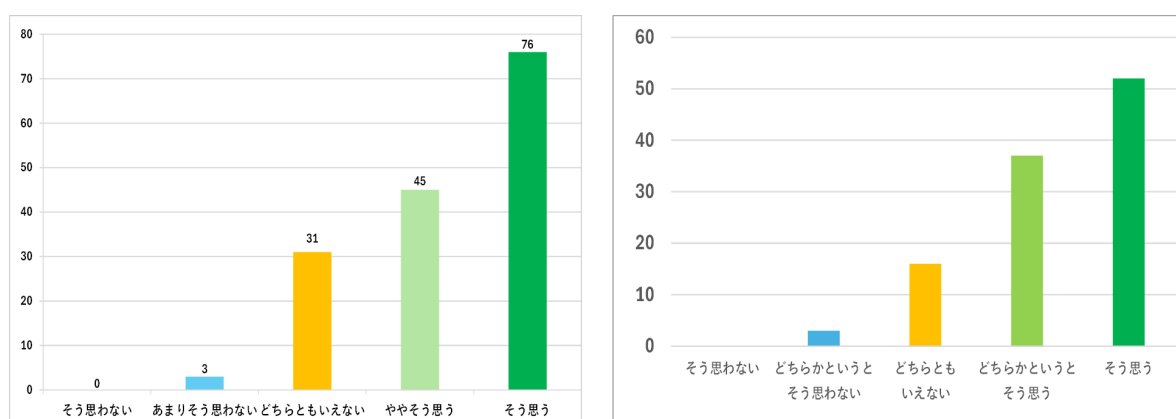


図 67 白杖検知が安心感向上に寄与するかを問う設問(左:秋保ルート、右:東部北ルート)

(3) スライディング有り無しの場合のスループット測定

スループットを測定した結果を下記に示す。図 68 は夢メッセみやぎから仙台港フェリー乗り場を歩行した際の測定結果を示しており、図 69 は仙台港フェリー乗り場から夢メッセみやぎのルートを歩行した際の測定結果を示している。また、グラフ中の赤線が評価対象(スライディング適用)で青線が評価対

象(ワイド適用)、緑線が評価対象(ノーマル)、橙線がトラヒック負荷端末を示している。なお、トラヒック負荷端末については端末ごとの変動に差分がないため、1台のみを選択して本グラフに掲載している。図 68、図 69 の両結果において、一部スループットの落ち込みが発生しているが、これはネットワークの品質によるものと考えられる。測定ルートの一部には、基地局のセルとセルの境界になるポイントがあり、品質が安定しないため、一時的にスループットの劣化が起きていると考えられる。

図 68 について、測定期間中の大半でスライシング適用端末が 30Mbps で安定して通信ができていたことが分かる。ワイド適用端末は 30Mbps で通信できている区間はあるが、一部区間で 30Mbps を下回っていることを確認した。ノーマル適用端末では、大半の区間で 10Mbps を下回る結果となった。

図 69 でも同様に、スライシング適用端末は測定区間の大半で 30Mbps を維持する結果となっており、夢メッセみやぎと仙台港フェリーターミナル間では往路・復路ともにスライシング適用による安定した通信を実現できたことが分かる。

図 68、図 69 の両結果において、一部スループットの落ち込みが発生しているが、これはネットワークの品質によるものと考えられる。測定ルートの一部には、基地局のセルとセルの境界になるポイントがあり、品質が安定しないため、一時的にスループットの劣化が起きていると考えられる。

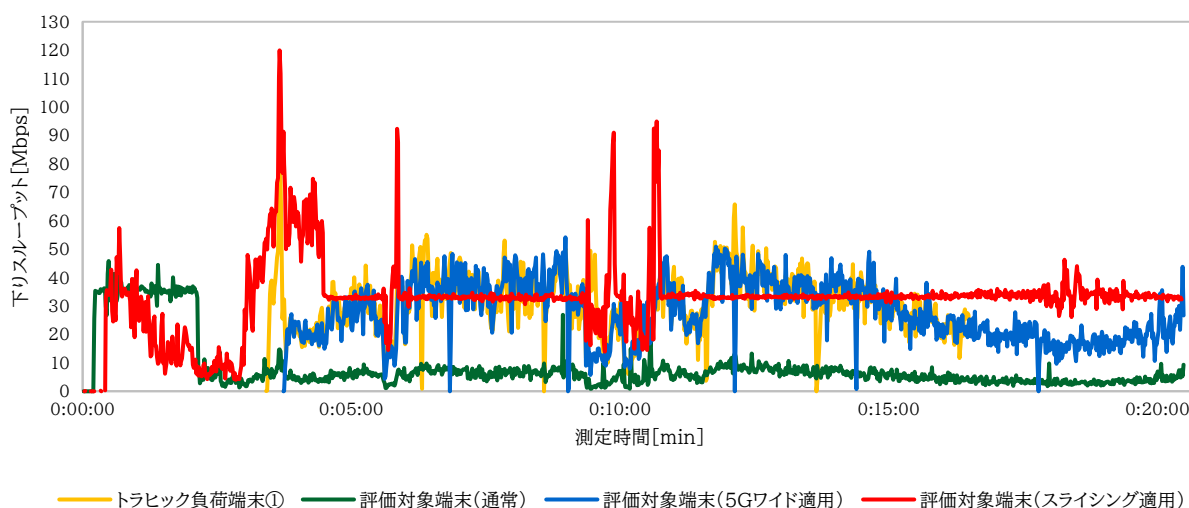


図 68 夢メッセみやぎ→仙台港フェリー乗り場区間におけるスループット測定結果

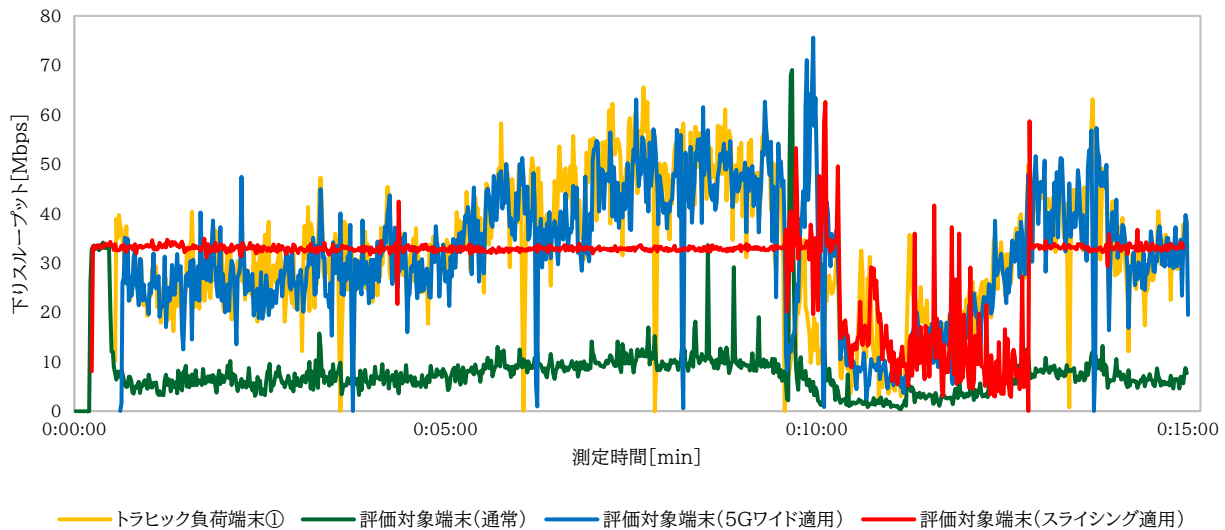


図 69 仙台港フェリー乗り場→夢メッセみやぎ区間におけるスループット測定結果

(4) スライシング技術を使用し、輻輳環境でも自動運転車両制御に必要なデータの受信

1. スライシング SIM の評価結果

表 33 より、スライシング SIM を用いた走行(走行 1)では、サーバから送信された 274 件のデータに対し、全てのデータを正常に受信し、受信率 100% を達成した。

本測定は、無線負荷を与えた高輻輳環境を想定した条件下で実施しており、そのような環境下においても車両制御に関わるデータを欠損なく受信できた点は特筆すべき結果である。

この結果から、スライシングを適用することで、イベント開催時のような高輻輳環境下においても、車両制御通信に求められる高い信頼性を安定して確保できることが実測により確認された。

2. 5G ワイド SIM の評価結果

表 33 より、5G ワイド SIM を用いた走行(走行 2)では、179 件の送信データに対し、全てのデータを受信し、受信率 100% を達成した。

スライシング SIM と比較すると制御の仕組みは異なるものの、同一エリア・同一条件下で高い受信率を示しており、5G ワイドにおいても一定の通信信頼性を確保できることが確認された。ただし、スライシング SIM は無線リソースの分離・制御が行われているのに対し、5G ワイドはベストエフォート通信(実効速度の保証がされておらず、利用時の回線混雑状況等により通信速度が変動する通信方式)であるため、輻輳状況によっては通信品質が変動する可能性がある。その点を踏まえると、5G ワイドは条件付きで高い受信率を実現できる通信手段と評価できる。

3. 標準(ノーマル)SIM の評価結果

表 33 より、標準(ノーマル)SIM を用いた走行(走行 3)では、194 件の送信データに対し 175 件の受信に留まり、受信率は約 90.2% となった。

同一エリア・同一測定条件下で実施したにも関わらず、スライシング SIM および 5G ワイド SIM と比較して明確な差が確認され、高輻輳環境下では通信の欠損が発生しやすいことが実測結果から示された。

このことから、標準 SIM では自動運転バスの車両制御に関わるデータ通信に求められる信頼性を安定して確保することは難しいと評価できる。

表 33 データ受信率

	対象	データ送信数	データ受信数	受信率(%)	場所	SIM種別
走行 1	工事情報	274	274	100	仙台港付近のスライミング調整区間	スライミングSIM
走行 2	工事情報	179	179	100	仙台港付近のスライミング調整区間	5GワイドSIM
走行 3	工事情報	194	175	90.20618557	仙台港付近のスライミング調整区間	ノーマルSIM

(5) 白杖検知成功率 90%以上

白杖検知について、以下 4 つ (TP、FP、FN、TN) の定義のもと、AI 画像解析結果を収集し、正解率、再現率、誤検知率、適合率をそれぞれ算出した。

- TP (True Positive): システムが白杖を見つけたと判断し、実際に白杖だった場合
 - FP (False Positive): システムが白杖を見つけたと判断したが、実際は白杖ではなかった場合
 - FN (False Negative): システムが白杖を見つけていないが、実際は白杖だった場合
 - TN (True Negative): システムが白杖を見つけておらず、実際も白杖ではなかった場合
-
- 正解率: 全体としてどの位正しく判断できたかを表す指標
 - 再現率: あるものを見逃さず検知できたかを表す指標
 - 誤検知率: ないものを誤って検知した割合
 - 適合率: 検知したもののうち、どれだけ本物だったかを表す指標

それぞれの確率を算出する計算式は以下の通りとなる。

- 正解率 = $TP + TN / (TP + TN + FP + FN)$
- 再現率 = $TP / (TP + FN)$
- 誤検知率 = $FP / (FP + TN)$
- 適合率 = $TP / (TP + FP)$

上記いずれの場合も、エッジ側での検知率に対する遠隔側での検知整合率は、目標値を上回る結果となった。

3) KPI/KGI との比較結果

表 34 ユースケース②における KPI/KGI(2)

定性評価 / 定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	自動運転バス車内入口のカメラによる白杖検知により、白杖所持者の乗降時および乗車中の安全確保に寄与すること。
定量評価	(2)	イベント期間中のような高い輻輳環境でも、スライミングの活用により、自動運転の車両制御に関わるデータが 99% 受信できること。

	(3)	エッジ側処理に対し、1Mbps 以上での伝送レートを確保した状況下で、遠隔処理による白杖検知成功率が 90%以上であること。
--	-----	--

(1) 自動運転バス車内入口のカメラによる白杖検知により、白杖所持者の乗降時および乗車中の安全確保に寄与すること【定性評価】

カメラ視野の最適化により、白杖が確実に映像へ収まる環境が整い、安全確認に必要な基礎条件が満たされた。

また、複数人が重なる状況でも検知が維持され、白杖を見落とす可能性が大幅に低下し、さらには類似物体(傘、一般の杖)や色の近い服装が存在する場面でも安定した検知が行われ、白杖を見逃さない状態が形成された。

これらの結果から、安全確保に必要な検知精度を実環境に近い条件下でも維持できることが確認された。

(2) イベント期間中のような高い輻輳環境でも、スライシングの活用により、自動運転の車両制御に関わるデータが 99%受信できること【定量評価】

本検証における KPI は、「車両制御に関わるデータの受信率が 99%以上」である。結果を以下に示す。

- スライシング SIM
 - 実測において受信率 100%を達成
 - 高輻輳環境下でも安定した通信品質を確認
 - KPI を十分に満たしている
- (参考)5G ワイド SIM
 - 実測において受信率 100%を達成
 - 高い通信品質は確認できたものの、輻輳状況に依存
 - KPI 達成の可能性はあるが、安定性の観点ではスライシングに劣る
- (参考)標準(ノーマル)SIM
 - 受信率が 99%を下回る結果
 - KPI 達成は困難

以上の結果から、イベント期間中のような高輻輳環境下においても自動運転バスの車両制御に関わるデータ通信の KPI(99%受信率)を安定して満たすためには、スライシングの活用が最も有効であることが示された。

(3) エッジ側処理に対し、1Mbps 以上での伝送レートを確保した状況下で、遠隔処理による白杖検知成功率が 90%以上であること【定量評価】

正解率、再現率、誤検知率、適合率の4つの観点でエッジ側での検知結果と遠隔側での検知結果を比較したものを以下に示す。

それぞれの検知率を比較した検知整合率は、4 つ全ての観点においてKPI目標値である 90%以上という結果が示された。

表 35 検知結果

	画像を基にした検知率		エッジ側での検知率に対する 遠隔側での検知整合率
	エッジ側の映像を使用	遠隔地へ送信後の映像を使用	
正解率	92.2%	90.2%	98.0%
再現率	90.0%	86.7%	96.7%
誤検知率	4.8%	4.8%	100.0%
適合率	96.4%	96.3%	99.9%

4) 成果・課題

(1) 自動運転バス車内入口のカメラによる白杖検知により、白杖所持者の乗降時および乗車中の安全確保に寄与すること

【成果】

カメラ配置と AI 画像解析処理の最適化によって、複雑な状況下でも高精度の検知が実現した点は、安全対策上大きな成果である。人物同士の重なりや類似物体混在といった難しい条件でも誤検知が抑制され、正しく白杖を把握することができた。また監視者は必要時のみ映像確認を行う運用が可能となり、安全を維持しながら効率的な業務遂行を支援する仕組みであることが示された。

加えて、交通事業者を対象としたアンケート結果(有効回答数 n=5)においても、白杖検知機能について「良好」との評価が全回答者から得られており、現場運用の観点からも本機能の有効性および安全性への寄与が確認された。これにより、技術的な検知精度だけでなく、実運行を担う事業者視点においても一定の実用性が認められる結果となった。

【課題】

強い太陽光による明暗差や反射が生じた際には検知精度が一時的に不安定となり、アラート発報の遅れにつながる可能性が確認された。光環境の変化は避けられないため、安全確保の観点からも処理の安定性を高める設定調整が必要である。今回得た知見は現場でより確実に白杖を検知できる環境を整備するための前向きな改善の土台となる。

(2) イベント期間中のような高い輻輳環境でも、スライシングの活用により、自動運転の車両制御に関わるデータが 99%受信できること。

【成果】

本検証では、イベント開催時を想定した高輻輳環境下において、スライシングを適用することで自動運転バスの車両制御通信に必要な通信品質および信頼性を確保できることを実測により確認した。

スループット評価において、スライシング適用端末は KPI20Mbps のところ測定区間の大半で約 30Mbps を安定的に維持し、5G ワイドおよび標準 SIM と比較して最も安定した通信特性を示した。特に、多数のトラヒック負荷端末が存在する環境下においても、通信品質の大きな劣化が見られなかった点は、無線リソースを分離・制御するスライシングの効果を明確に示す結果である。

さらに、車両制御に関わるデータの受信検証では、スライシングにおいて受信率 100%を達成し、KPI である「受信率 99%以上」を十分に満たした。

同一条件下で実施した標準 SIM では受信率が約 90%に留まったことから、高輻輳環境下においては、ベストエフォート通信では車両制御に必要な信頼性を安定して確保することが困難であることが示された。

以上より、イベント開催時のような高輻輳環境下においても、自動運転バスの安全運行に不可欠な車両制御通信を安定的に成立させるためには、スライシングの活用が極めて有効であり、実運用に適した通信方式であることを示すことができた点が本検証の大きな成果である。

【課題】

本検証により、スライシングの有効性は確認できたが、今後の社会実装を見据えると、以下の点について整理・検討を進める必要がある。

スライシングを適用した通信の提供範囲や提供条件(エリア、時間帯、利用可能帯域等)について、運用面での整理が必要である。

スライシング適用時の監視方法、障害発生時の切り分け手順、復旧フロー等、運用設計の明確化が求められる。

これらの点を整理することで、スライシングを活用した自動運转向け通信基盤の実運用性をさらに高めていくことが可能である。

加えて、本検証ではスライシングの実装状況からダウンリンクのみで実施したが、今後実装されるアップリンクでの検証も自動運転の遠隔監視において重要となる。

(3) エッジ側処理に対し、1Mbps 以上での伝送レートを確保した状況下で、遠隔処理による白杖検知成功率が 90%以上であること。

【成果】

無線ネットワーク経路を挟むことによる影響は小さく、遠隔監視環境でもエッジ側で処理した場合と同等程度の検知性能であることが示された。

これは、今後の本番運用環境においても安定した検知品質を維持できる可能性を示唆しており、今回のように遠隔からの監視や解析が必要なシナリオにおいても十分に実用的な性能を提供できることを裏付けるものとなった。

【課題】

今回の実証では、遠隔側に送信された映像を用いた白杖検知時に、エッジ側で直接処理した場合と比較して検知精度がわずかながら低下する傾向が確認された。

これは、映像伝送に伴う圧縮処理やネットワーク状況によるフレーム欠損等、遠隔処理特有の影響が

積み重なることに起因するものであり、今後の運用拡大を考えるうえで解消しておくべき重要なポイントの一つであると認識した。

高い検知精度を維持するには、映像伝送の品質を安定させる必要がある。そのため、必要に応じて映像の途切れを抑制する伝送技術を組み合わせる、あるいはネットワーク状況の変動を吸収できる設定や仕組みを検討することで、遠隔側の検知品質をより安定化できる余地がある。

今回得られた気付きに基づき、必要箇所を適切に補強することで、エッジ側・遠隔側のいずれにおいてもより安定した検知性能を実現できるよう、システム全体の信頼性向上につなげていきたい。

6.3 ③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証

当該ユースケースは実施していない。

6.4 ④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送：周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装

6.4.1 路面の凍結/積雪状況に応じた車両制御の実装、路面凍結センサデータの遠隔監視装置へのリアルタイム転送および路面状態の表示と走行モードへのアシスト

1) 実証スケジュール

実証スケジュールについては、実施計画書 4 章に基づいて検討・準備を行い、計画通りに実施した。

具体的には、2025 年5月から 10 月にかけて、要件検討およびシステム・KPI 設計を実施し、一部並行し、2025 年9月から 12 月にかけて、開発、実装および試験を行った。これらの準備工程を経たうえで、実証走行に向けた環境整備を完了した。

実証フェーズにおいては、2025 年 12 月下旬より実証走行を開始し、調整走行を実施した後、本走行を段階的に実施した。調整走行および本走行の期間中には、秋保ルートを対象として、路面凍結センサ等による路面状態データの取得、都市 OS 外部データ基盤を介した遠隔監視装置へのデータ連携、ならびに遠隔監視装置上での路面状態表示および走行モード判断支援に関する検証を行った。実証走行と並行してデータの取得および整理を実施し、冬季環境下における路面凍結・積雪状況を含む条件下での運用成立性について評価を行った。

2) 開発・評価項目の結果

表 36 ユースケース④における開発・評価項目(1)

番号	開発・評価項目
(1)	都市 OS から受信した凍結情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価
(2)	路面凍結状況に応じた走行モード切り替えの妥当性評価
(3)	凍結情報を前提とした一連の運行判断プロセスの実運用適合性評価
(4)	凍結センシングのサンプリング周期に関する評価
(5)	路面状態判定精度および凍結情報受信率に関する評価

(1) 都市 OS から受信した凍結情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価

【実証結果】

交通事業者(遠隔監視員)を対象としたアンケート(有効回答者数 n=2)では、都市 OS から受信した凍結情報が遠隔監視装置の画面上に適切に反映され、運行判断に必要な情報を把握できるとの評価が得られた。また、凍結情報の表示方法や画面構成についても、遠隔監視業務の中で操作上の大きな支障はなく、実運用を想定した場合においても対応可能な水準であるとの回答であった。

【課題・考察】

一方で、路面凍結情報と自動運転車両の挙動(減速・走行モード切り替え等)との関係性については、遠隔監視装置上でより直感的に把握できる表示方法の工夫が望まれるとの示唆が得られた。また併せ

てルート上の天候情報を表示すべきとの意見が得られた。今後の社会実装を見据えた運用においては、凍結情報の表示優先度や強調方法を整理、ならびに気象庁等の天候情報を同時に表示することで、遠隔監視員の状況把握負荷を低減し、より迅速かつ確実な運行判断につながることを期待される。

(2) 路面凍結状況に応じた走行モード切り替えの妥当性評価

【実証結果】

秋保ルートにおいて、車両に搭載した路面センサにより取得した路面状況検知結果を基に、道路状態をシステム上で6区分に分類し、凍結モードを含む車両制御判断の妥当性について検証を行った。

本検証では、路面状況検知結果を運転士に提示したうえで、実際の走行環境における運転士が考える路面状況と、システムが判定した道路状態区分との整合性について、運転士(有効回答者数 n=2)を対象にアンケート調査を実施した。その結果、いずれの運転士からも、システムによる路面状況の判定および、それに基づく凍結モード制御の判断について、実際の路面状況と照らしても問題ないとの回答が得られた。

このことから、路面センサによる検知結果および道路状態区分の考え方は、実運用における判断として一定の妥当性を有していることが確認された。

【課題・考察】

本実証により、路面センサを用いた路面状況検知および凍結モード制御の基本的な妥当性は確認できた一方で、今後の検証および社会実装を見据えた際の課題も整理された。具体的には、本検証ではレンタカー車両を用いて評価を実施しているが、実際に運行した自動運転バス車両とは車幅が異なるため、運転士が視認する路面状況の範囲と、センサが検知する範囲との関係について、さらなる検証の余地があるとの意見が示された。このため、今後は実運行を想定したバス車両と同等の車幅を有する車両を用いて検証を行うことが望ましいと考えられる。また、現状では路面センサを車両の片側(左側)のみに搭載しているが、路面状況のばらつきや左右差をよりの確に把握する観点から、将来的には両側へのセンサ搭載を検討することも有効であるとの示唆が得られた。ただしコストの観点から片側のみになる場合、車両の左側に搭載するのが妥当とのコメントも得られた。これらを踏まえ、路面センサによる検知精度および凍結モード制御の信頼性向上に向けては、車両条件やセンサ配置の最適化を含めた追加検証を行うことが、今後の取り組みとして重要であると整理できる。

(3) 凍結情報を前提とした一連の運行判断プロセスの実運用適合性評価

【実証結果】

交通事業者(遠隔監視員)を対象としたアンケート(秋保ルート、有効回答者数 n=2)では、路面凍結情報を踏まえた走行モード切り替えや減速等の車両挙動について、安全性確保の観点から妥当であり、実運用上も許容可能な対応であるとの評価が得られた。特に、凍結が想定される区間において自動的に減速・慎重走行へ移行する挙動については、遠隔監視による運行判断と整合しており、安全側に配慮した制御として問題ないとの回答であった。

3) KPI/KGI との比較結果

表 37 ユースケース④における KPI/KGI(1)

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	(1)	凍結路面をリアルタイムに検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の即時性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結センシングのサンプリングが 1.0 秒以内となるか確認する。
	(2)	凍結路面を正確に検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の妥当性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、6種類の路面状態判定精度が 95% 得られることを確認する。
	(3)	車両制御(モード切り替え・減速)の即時性・妥当性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結情報データをエリアカバー率と同等に 92% 受信できるか確認する。(自動運転車両側の受信率)
定性評価	(4)	遠隔監視員による運行状況の判断や対応の正確性・効率性を高めるため、都市 OS から受信した凍結情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映されることを確認するとともに、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを検証する。

(1) 凍結路面をリアルタイムに検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の即時性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結センシングのサンプリングが 1.0 秒以内となるか確認する。【定量評価】

路面状態のリアルタイム検知において、センサ入力のサンプル周期は可能な限り短い方が検知精度は高まるが、センサの応答時間には限界がある。また、サンプル周期内に取得したデータから求めるべき路面状態を計算のうえ遠隔監視室に送信し、遠隔監視装置上に周期的にリアルタイム表示させる転送時間も検討する必要がある。このため、本路面センシングシステムにおいては、表 38 に示すように使用する多様なセンサの特性を考慮し、実際のシステムにおけるセンサの最適なサンプリング時間を検証した。この表 38 から分かるように、各センサによって最小サンプリング周期が異っており、特に路面・露点温度センサおよび路面レーザセンサの最小サンプリング周期は 1.0sec であり、その他のセンサは、これよりも小さい。このことから、システム全体のサンプリング周期は全てのセンサの最大公約数でなければならないため、最終的に 1.0sec を最小可能周期に選定した。

次に、実際に路面センシングシステム全体のサンプリング周期を 1.0sec に設定し、それがリアルタイムに路面状態を計算し、その判定結果を全てのセンサデータとともに MEC 経由のネットワークで転送し、遠隔監視装置にリアルタイムに表示できるかを検証した。表 12 に、GPS からの基準時刻をベースとし、センササーバ内で各センサ(加速度センサ、路面・露点温度センサ、路面レーザセンサ)からのサンプリング周期を 1.0sec に設定し、路面状態、ラフネス、滑り摩擦係数を計算・判定するとともに、判定結果をセンササーバからモニタ上にローカル表示させ、そのタイミングを計測した結果を示す。この表 12 からわかるように、ラフネスおよび路面状態・滑り摩擦係数とも、計算・判定に要する処理時間はそれぞれ、0.42, 0.45sec であり、両方ともサンプリング周期以内に計算結果を出力していることが分かる。この

ように、路面温度センサおよび路面/露点温度センサともその測定・計算・判定において 1.0sec 内で実行できており、センササーバ処理能力も十分余裕があることを示している。

また、これらのセンサデータおよび計算・判定されたデータは、路面状態を除いて全て実数かつ少数点以下3～7桁であり、これを CSV フォーマットにてデータ転送する際、1 サンプル合計で 18 項目となる。従って 1 項目のデータサイズに 4byte を割り当てており、1 サンプルあたり合計 720bytes を転送している。これは、MEC ネットワークの平均実効スループットは実装測地で 5Mbps であることから、1 サンプルあたり、1.15msec の転送時間となる。これは、サンプル周期 1.0sec に比較して十分小さい値であり無視できるため、遠隔監視装置に転送しても、ほぼリアルタイムに表示が可能となっている。

以上の検証結果より、センシングシステムのサンプリング周期を 1.0sec にしても十分にリアルタイム性を確保できていることが確認された。

表 38 各センサの最小サンプル周期およびデータ桁数

センサ入力	センサデータ	単位	サンプル周期	データ桁数
GPS	時刻	msec	0.1 sec	小数点以下3桁
	緯度	Latitude	0.1 sec	小数点以下 7 桁
	経度	Longitude	0.1 sec	小数点以下 7 桁
加速度 センサ	X,Y,Z 軸加速度	mm/(sec) ²	1.0 msec	小数点以下 5 桁
	X,Y,Z 軸角速度	rad/sec	1.0 msec	小数点以下 5 桁
	ラフネス(平坦率)	mm	1.0 msec	小数点以下 5 桁
路面・露点 温度センサ	外気温度	℃	1.0 sec	小数点以下 1 桁
	露点温度	℃	1.0 sec	小数点以下 1 桁
	路面温度	℃	1.0 sec	小数点以下 3 桁
路面レーザ センサ	水幕厚	mm	1.0 sec	小数点以下 5 桁
	氷幕厚	mm	1.0 sec	小数点以下 5 桁

表 39 センササーバ内での1周期での計算・判定・表示時間の実測値

センサデータ	単位	計算時間/周期	表示周期	データ桁数
X,Y,Z 軸の変位量	mm	0.45 sec	1.0 sec	小数点以下 5 桁
バネ上下変位量	mm		1.0 sec	小数点以下 5 桁
バネ下上下変位量	mm		1.0 sec	小数点以下 5 桁
ラフネス(平坦率)	mm		1.0 sec	小数点以下 5 桁
湿度	%	0.42 sec	1.0 sec	小数点以下 3 桁
滑り摩擦係数	0～1.0		1.0 sec	小数点以下 2 桁
路面状態	6 states		1.0 sec	整数1桁(注1)

注 1:1 乾燥路、2 湿路、3 湿潤路、4 シャーベット、5 積雪路、6 凍結路

(2) 凍結路面を正確に検知することで、車両制御(モード切り替え・減速)の妥当性を高め、自動運転

バスの安全性向上に寄与するよう、6種類の路面状態判定精度が 95%得られることを確認する。

【定量評価】

路面状態の判定精度を確認するため、レンタカーを路面測定車として各種センサおよびセンササーバを設置し、路面状態を計算・判定した結果を検証した。まず、路面測定車のセンササーバにて各種センサよりサンプル周期 1.0sec でセンシングのうえ、これらのセンサデータを集積し、路面状態を計算・判定した。その結果を1.0sec ごとに地図上に表示させるとともに、カメラ映像による路面状態も同期をとりながら記録するとともに、図 70 に示すように車内モニタ上にローカル表示させた。システム上の判定結果と実際の路面状況との照合においては、走行ルート全体で路面測定車へ同乗した運転士に、モニタ上に判定表示された道路状態と肉眼での判定結果を基に視覚評価を行った。本評価において、路面測定車は実際の自動運転バスと同じ 40km/h で走行し、1.0sec ごとに50分間の走行により、約3,000ポイントの道路状態を判定した。この間、センサによる判定結果と視覚判定との比較評価を行い、異なる点のみを記録した。その結果、自動運転バス走行路全体において、センサによる判定は97~99%以上でバス運転士による判定と一致していることを確認できた。わずかに1~3%は、Wet(湿路)とMoist(湿潤)との判定のズレが見られる場合があったが、それ以外の結果は正しく判定されており、十分な精度を達成していることを確認できた。

同様に、これらのセンサデータおよび路面判定結果およびカメラ映像結果は、走行路周回後にMECネットワーク転送により遠隔監視装置に転送され、図 71 に示すように、監視モニタ上に表示され、監視担当者により確認を行った。その結果、同様にほぼ100%に近い判定精度であった。またその際、Dry(乾燥路)とWet(湿路)はカメラ映像のみでは正確な判定は困難であるが、本システムの路面レーザセンサは路面上の水分膜厚も0.01mm の分解能で判定できるため、カメラ映像では判定出来ない精度を有することがわかった。以上から、本路面状態センシングシステムは 6 種類の路面状態判定精度が 95%以上を達成できていることが確認できた。

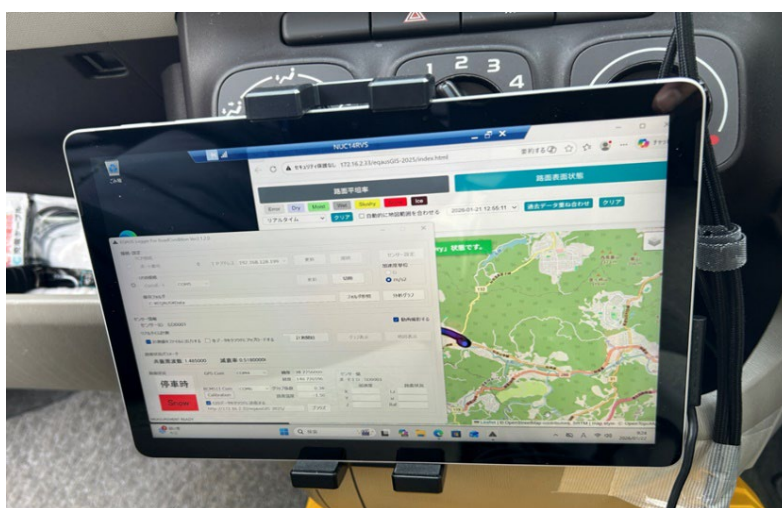


図 70 車内モニタによる道路状態操作モニタリングシステム

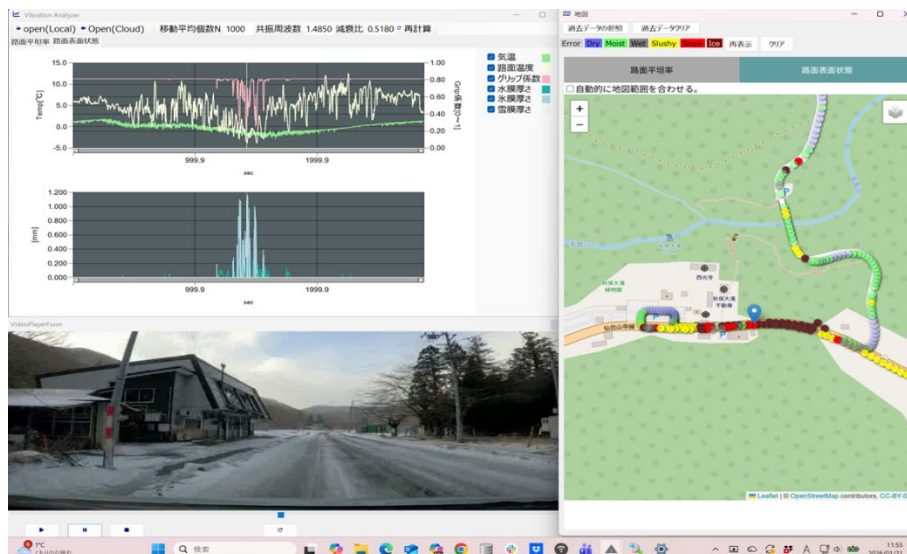


図 71 遠隔監視室の路面状態監視表示システム

- (3) 車両制御(モード切り替え・減速)の即時性・妥当性を高め、自動運転バスの安全性向上に寄与するよう、凍結情報データをエリアカバー率と同等に 92%受信できるか確認する。(自動運転車両側の受信率)【定量評価】

4.4.1 に記載の通り、凍結情報通知において自動運転車両側での受信率を確認するため、5 回の計測を実施した。凍結情報通知の受信率はいずれの測定でも KPI である 92% 以上の受信率を満たす結果となった(表 40)。本結果から、都市 OS から取得した凍結情報を自動運転車両へ伝達するにあたり、協調型インフラ基盤を活用した構成(マルチキャリア+ローカル 5G)は平均受信率「97.82%」と高い信頼性を有していると考えられる。

一方で、中山間地等の通信不感地における、自動運転車両への凍結情報の安定した配信を実現するためには、協調型インフラ基盤の構成要素の一つとして、次年度以降、NTN(非地上系ネットワーク)等を活用したネットワークカバー率の向上を検討する必要がある。

表 40 凍結情報通知の受信率測定結果

※計測2については走行中にタイヤへのチェーン装着対応があったため、総走行時間が長い(データ数が多い)

	受信数(件)	送信数(件)	受信率(%)
計測1	4644	4573	98.47
計測2	7904	7830	99.06
計測3	4673	4519	96.70
計測4	4673	4519	96.70
計測5	4453	4402	98.85

- (4) 遠隔監視員による運行状況の判断や対応の正確性・効率性を高めるため、都市 OS から受信した凍結情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映されることを確認するとともに、

システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを検証する。【定性評価】

本実証では、都市 OS から受信した凍結情報が遠隔監視装置のダッシュボードに確実に反映されること、また遠隔監視員が運行状況を正確かつ効率的に判断できるよう、ユーザインターフェースおよび操作性に問題がないかを評価した。

秋保ルートにおいて実施した関係者アンケート(有効回答者数 n=2)の結果、以下の点が確認された。まず、凍結情報の反映状況について、回答者 のうち 2 名(100%) が「凍結情報がダッシュボードに確実に表示されていた」と回答した。特に、路面状態(凍結の有無)が色分けで明確に可視化されていた点が評価され、監視者が現地状況を即時に把握するうえで有効であったとの意見が得られた。

次に、ユーザインターフェースおよび操作性についても、回答者 のうち 2 名(100%) が「概ね良好」と評価した。ダッシュボード上の情報配置や操作体系が直感的であり、必要な情報に素早くアクセスできたことが確認された。一方で、1 名から「表示文字を大きくしてほしい」「悪天候時には画面のコントラストをより高めたい」といった改善提案も寄せられ、視認性向上の余地が示された。

以上の結果から、秋保ルートにおける遠隔監視においては、都市 OS からの凍結情報が適切に伝達・表示され、監視者の判断支援に十分寄与していること、また、ユーザインターフェースや操作性も実用上問題なく、監視業務に支障をきたす要因は認められないことが確認された。加えて、視認性向上に向けた具体的な意見も得られたことから、今後のユーザインターフェースの改善に資する知見が得られたと言える。

4) 成果・課題

【成果】

本実証では、都市 OS から配信された路面の凍結/積雪情報に応じた車両制御および路面凍結センサデータの遠隔監視装置へのリアルタイム転送および路面状態の表示と運転モードへのアシスト機能を実装し、その有効性を検証した。

路面凍結情報の遠隔監視装置への反映および操作性に関して、遠隔監視員を対象としたアンケート調査では路面凍結情報は遠隔監視装置の画面上に適切に反映され、表示方法や画面構成を含め運行判断に必要な情報を把握できるとの評価が得られた。路面凍結状況に応じた走行モード切り替えの妥当性についても、定量評価では路面状態判定の精度は 97%以上を確保していることを確認しており、運転士を対象としたアンケート調査で路面状況判定システムの判定結果は実際の路面状況と照らし合わせて妥当である旨の回答を得られた。また、路面凍結情報の活用を前提とした運行判断プロセスについては、遠隔監視員を対象としたアンケート調査で安全性確保の観点から妥当であり、実運用上も許容可能な対応であるとの評価が得られた。路面凍結情報の配信を支える通信環境についても、都市 OS から取得した路面凍結情報を自動運転車両へ伝達するにあたり、協調型インフラ基盤を活用した構成(マルチキャリア+ローカル 5G)は平均受信率「97.82%」と高い信頼性が確認された。これらの結果から、遠隔監視装置での路面状況判定結果の表示機能および判定結果の活用は、実運用における運行判断に関して一定の信頼性・妥当性を有していることが確認され、路面凍結のリスクがあるエリアでの自動運転バス実装に向けて有効な機能であることが確認された点は、本実証における成果である。

【課題】

一方で、いくつかの課題も明らかとなった。路面凍結情報の遠隔監視装置への反映および操作性に

関しては、遠隔監視装置において、自動運転車両が路面凍結情報を受信する前後の挙動をより直感的に把握できる表示方法や、ルート上の天候情報を表示する工夫を望む声が見られた。路面凍結状況に応じた走行モード切り替えの妥当性については、路面状況の検知方法に関して、事前走行で路面状況を検知する際の車両と実際に運行する自動運転バス車両の車幅の関係性や、路面センサの取り付け位置において更なる検証の余地が確認された。これらを踏まえ、遠隔監視装置で表示する情報量や表示方法、路面状況の検知方法と検知精度と信頼性の向上に関して、今後に向けて更なる検証の余地が示された。通信環境に関しては、通信不感エリアにおいてより安定した路面凍結情報の配信に向けて、協調型インフラ基盤の構成要素の一つとして、次年度以降、NTN(非地上系ネットワーク)等を活用したネットワークカバー率の向上を検討していきたい。

6.4.2 災害情報と道路工事状況に応じた車両制御の実装

1) 実証スケジュール

実証スケジュールについては、実施計画書 4 章に基づき検討・準備を行い、計画通りに実施した。

具体的には、2025 年 5 月から 10 月にかけて要件検討およびシステム・KPI 設計を実施し、2025 年9月から 11 月にかけては並行して開発、実装および試験を行った。これらの準備工程を経たうえで、実証走行に向けた環境整備を完了した。

実証フェーズにおいては、2025年 11 月中旬以降、東部北ルートを対象とした実証走行を実施し、調整走行および本走行を段階的に行った。実証期間中には、災害情報および道路工事情報のダミーデータを用い、都市 OS を介した情報連携、遠隔監視装置上での情報確認、ならびに運行判断プロセスについて検証を実施した。

併せて、実証走行と並行してデータの取得および整理を行い、災害・工事ユースケースにおける運用成立性について評価を行った。

2) 開発・評価項目の結果

表 41 ユースケース④における開発・評価項目(2)

番号	開発・評価項目
(1)	都市 OS から受信した情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価
(2)	災害情報に基づく車両制御(ルート変更)の妥当性評価
(3)	工事区間における走行時の安全性向上に関する評価
(4)	工事・災害情報データの受信精度および車両制御への反映に関する評価

(1) 都市 OS から受信した情報の遠隔監視装置への反映および操作性の評価

【実証結果】

交通事業者の運転士および遠隔監視員を対象としたアンケート(有効回答者数 n=3)の結果、都市 OS から受信した災害情報について、遠隔監視装置のダッシュボード上で運行判断に必要な情報を把握できる(良好)と評価した回答者は 2 名(約 67%)であった。

また、災害情報の表示内容および視認性について、「良好」と回答した者は2名(約67%)となり、実運用を想定した遠隔監視業務において、情報把握や操作に大きな支障は生じない水準であることが確認された。

一方で、情報の強調表示方法、表示項目の優先度、災害情報と運行状況の関係性の分かりやすさといった点については、2名(約67%)の回答者から改善の余地がある旨の意見が示された。

【考察】

本実証の結果、交通事業者アンケートにおいて回答者の大半(3名中2名(約67%))が、都市OSから受信した災害情報を遠隔監視装置上で適切に把握できると評価しており、災害発生時における運行判断を支援する情報基盤として一定の有効性が確認された。

これは、災害発生時において遠隔監視員が迅速に状況を把握し、運行継続可否や対応方針を判断するための基盤として、都市OSと遠隔監視装置の連携が実運用レベルで成立することを示す結果であると考えられる。

一方で、少数ながら改善意見も確認されていることから、今後の実装フェーズにおいては情報の視認性向上や重要情報の強調表示等、ユーザインターフェース面での改善を行うことで、監視業務の負荷軽減および判断精度のさらなる向上が期待される。

(2) 災害情報に基づく車両制御(ルート変更)の妥当性評価

【実証結果】

交通事業者(運転士・遠隔監視員)を対象としたアンケート(有効回答者数 n=6)では、都市OSから受信した災害情報に基づく車両制御(ルート変更)について、安全性および運行判断の観点から概ね妥当であるとの評価が得られた。

加えて、一般試乗者を対象としたアンケート(有効回答者数 n=44)においても、ルート変更時の車両挙動や走行の安全性に関して、以下の結果が得られている。

具体的な質問事項として、走行ルート変更時のバスの動き(加速・減速・カーブ等)に関する設問(図72)に対しては、「良好」の回答者は40名(約91%)、「要改善」の回答者は4名(約9%)、「不適」の回答者は0名(0%)との結果となった。

また、ルート変更時に急な揺れや不安を感じるような動きがあったかどうかという設問(図73)に対しては、「良好」の回答者は38名(約86%)、「要改善」の回答者は6名(約14%)、「不適」の回答者は0名(0%)との結果となった。

また、ルート変更後も安全に走行していると感じられたかという設問(図74)に対しては、「良好」の回答者が39名(約89%)を占めており、多くの試乗者がルート変更後の走行について安全性を体感できていたことが確認された。

災害情報を受けた対応(停車・経路変更等)の妥当性に関する設問(図75)についても、「良好」の回答者は39名(約89%)、「要改善」の回答者は5名(約11%)、「不適」の回答者は0名(0%)との結果であり、災害情報に基づく車両制御が、視点においても概ね受容されていることが示された。

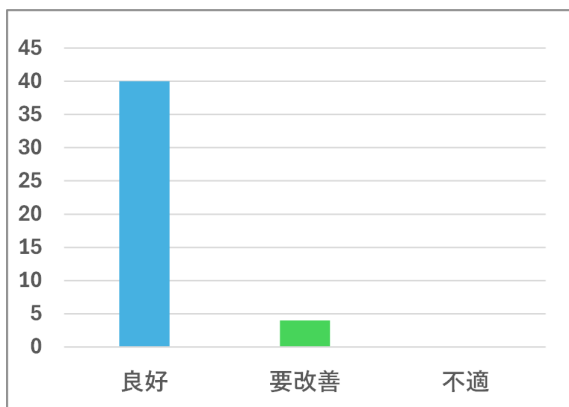


図 72 走行ルート変更時の挙動に関する設問

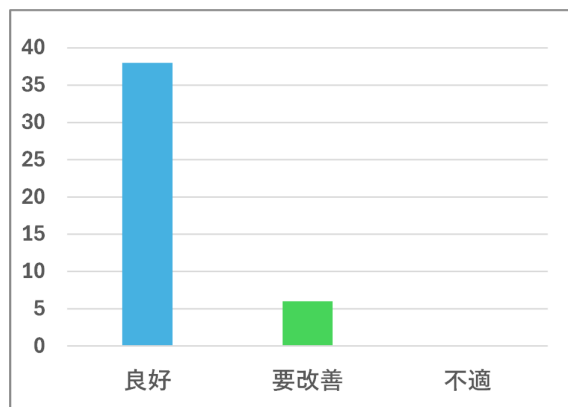


図 73 走行ルート変更時の急な揺れや不安定な動きを問う設問

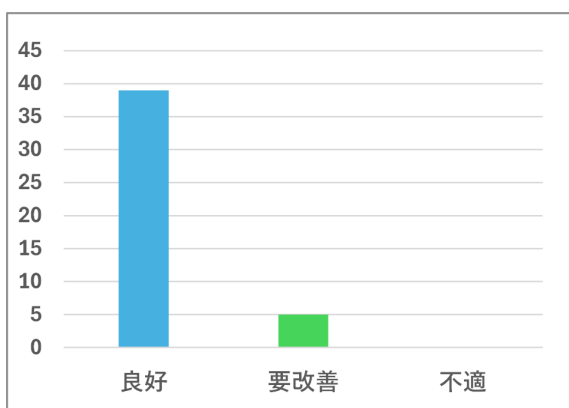


図 74 ルート変更後の安全性を問う設問

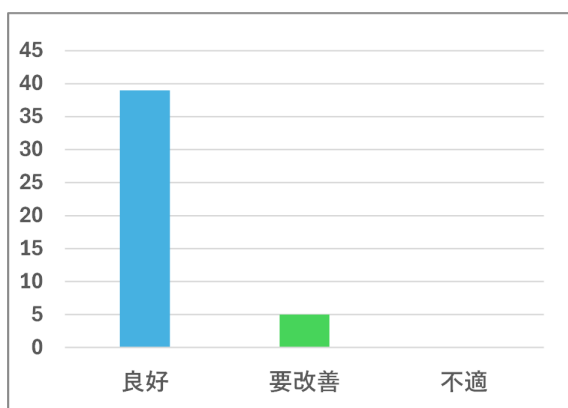


図 75 災害情報受信時の挙動の妥当性を問う設問

【考察】

本実証では、交通事業者アンケート(n=6)により、災害情報に基づくルート変更判断が運行判断として妥当であることが確認された。

さらに、一般試乗者を対象としたアンケート(n=44)においても、ルート変更時の車両挙動や走行の安全性に関して高い評価が得られており、運用側の判断妥当性と乗客側の体感安全性の両面から、一定の有効性が示唆された。一方で、「要改善」の回答者からは、ブレーキ操作時の違和感や急制動に対する不安感を指摘する自由記述が見られた。これらの意見は、災害情報に基づくルート変更そのものへの意見ではなく、制御時の挙動のさらなる平滑化や、事前説明・案内の工夫により改善可能な課題と整理できる。

以上より、災害情報に基づく自動運転車両制御(ルート変更)は、安全性および運行判断の妥当性の観点から一定の有効性を有しており、今後は自動運転車両挙動のさらなる最適化や情報提供方法の改善を通じて、乗客の安心感向上を図ることが重要であると考えられる。

(3) 工事区間における走行時の安全性向上に関する評価

【実証結果】

交通事業者(運転士・遠隔監視員)を対象としたアンケート(有効回答者数 n=6)では、工事区間に

における自動運転バスの走行挙動および安全性について、概ね妥当であるとの評価が得られた。

加えて、一般試乗者を対象としたアンケート(有効回答者数 n=64)においても、工事区間を含むルート変更時の走行挙動および安全性に関して、以下の結果が得られた。

走行ルート変更時のバスの動き(加速・減速・カーブ等)に関する設問(図 72)に対して、「良好」の回答は 54 名(約 84%)、「要改善」の回答は9名(約 14%)、「不適」の回答は 1 名(約 2%)という結果となった。

走行ルート変更時に急な揺れや不安を感じるような挙動の有無に関する設問(図 73)に対して、「良好」の回答は 53 名(約 83%)、「要改善」の回答は 11 名(約 17%)、「不適」の回答は 0 名(0%)という結果となった。

工事区間を含むルート変更後も安全に走行していると感じられたかに関する設問(図 74)に対して、良好の回答は 60 名(約 94%)、要改善の回答は 3 名(約 5%)、不適の回答は 1 名(約 1%)という結果となった。

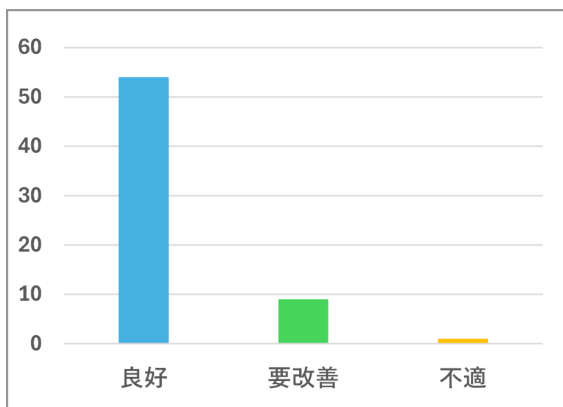


図 76 走行ルート変更時の挙動に関する設問

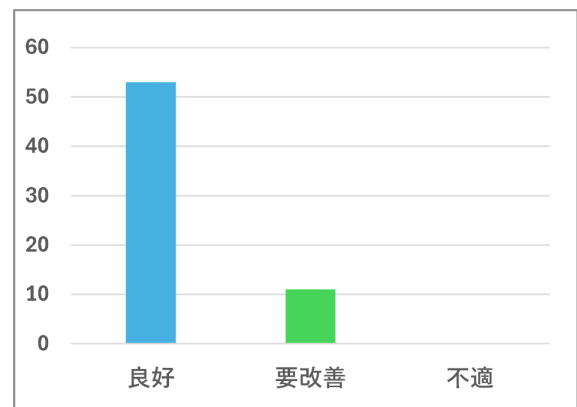


図 77 走行ルート変更時の急な揺れや不安な動きに関する設問

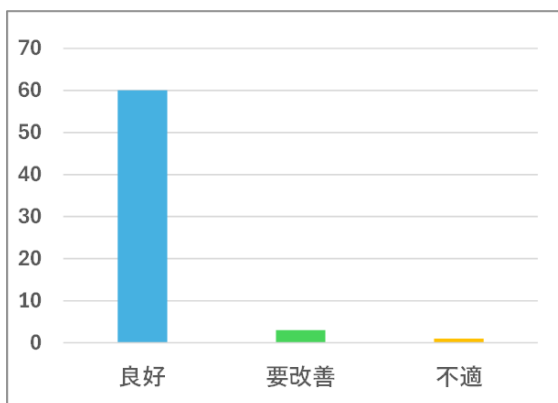


図 78 工事区間を含むルート変更後の安全性に関する設問

【考察】

本実証では、交通事業者および試乗者の双方から、工事区間における自動運転バスの走行挙動および安全性について概ね高い評価が得られた。

一方で、一部の設問において「不適」との回答が確認された。これらの自由記述を確認したところ、

- ・工事区間の回避時において第二走行車線に一般走行車両が存在していた
- ・当該状況下では安全確保を最優先し、自動運転を解除して手動介入が行われた

といった状況が背景にあることが示唆された。これは、自動運転システムの不具合によるものではなく、周辺交通状況(他車両の位置・挙動)を踏まえた安全側の運用判断によるものであり、むしろ異常時におけるフェイルセーフとして適切に機能した結果と評価できる。

以上より、工事区間における自動運転バスの走行は、通常条件下では安全性の向上に寄与していることが確認された一方、混雑時や第二走行車線への一般車両進入といった外乱条件下では、引き続き手動介入を含む運用設計が重要であることが明らかとなった。

今後は、こうした交通環境下での対応パターン整理や、自動運転継続可否判断ロジックの高度化を進めることで、さらなる安全性および運行安定性の向上が期待される。

(4) 工事・災害情報データの受信精度および車両制御への反映に関する評価

【実証結果】

本実証では、都市 OS から受信した災害情報と工事情報が、自動運転バスの運行判断および車両制御に適切に反映されているかについて、交通事業者および一般試乗者を対象としたアンケートにより定性評価を行った。

交通事業者(運転士・遠隔監視員)を対象としたアンケート(有効回答者数 $n=6$)では、都市 OS から受信した災害情報と工事情報が、遠隔監視装置の画面表示および運行判断において概ね適切に反映されているとの評価が得られた。特に、「災害情報と工事情報の内容が運行判断に活用可能な形で提示されていたこと」、「当該情報を踏まえた減速や停止、ルート変更といった判断が実運用上妥当であったこと」について、肯定的な意見が確認された。

一方で、自由記述においては、情報の種類や発生位置をより直感的に把握できる表示方法への改善要望も一部見られ、今後の運用改善に向けた示唆が得られた。

一般試乗者を対象としたアンケートでは、工事情報(有効回答者数 $n=64$)および災害情報(有効回答者数 $n=44$)を受けた際の自動運転バスの対応や車両制御への反映について評価を行った。

災害情報と工事情報を受けた際の対応(停車・走行ルート路変更等)の適切性に関する設問(図 75)に対して、災害シナリオ時に関しては「良好」の回答者は 39 名(約 61%)、工事区画回避シナリオ時に関しては「良好」の回答者は 55 名(約 86%)という結果となった。この結果から、多くの試乗者が、災害情報と工事情報に基づく減速や経路変更、停車といった対応について、安全かつ適切であったと評価している。

災害や緊急時を想定した走行に対する安心感に関する設問(図 76)に対しては、「良好」の回答者は 39 名(約 61%)、「要改善」の回答者は 5 名(約 8%)、「不適」の回答者は 0 名という結果となった。この結果から、災害や緊急時を想定した走行についても、多くの試乗者が安心して乗車できると感じたことが確認された。

また、災害情報と工事情報に関する案内内容の理解度に関する設問(図 77)に対して、「良好」の回答者は 52 名(約 81%)、「要改善」の回答者は 12 名(約 19%)、「不適」の回答者は 0 名という結果となった。案内内容の分かりやすさについては、一定数の試乗者から改善を求める意見が見られた。

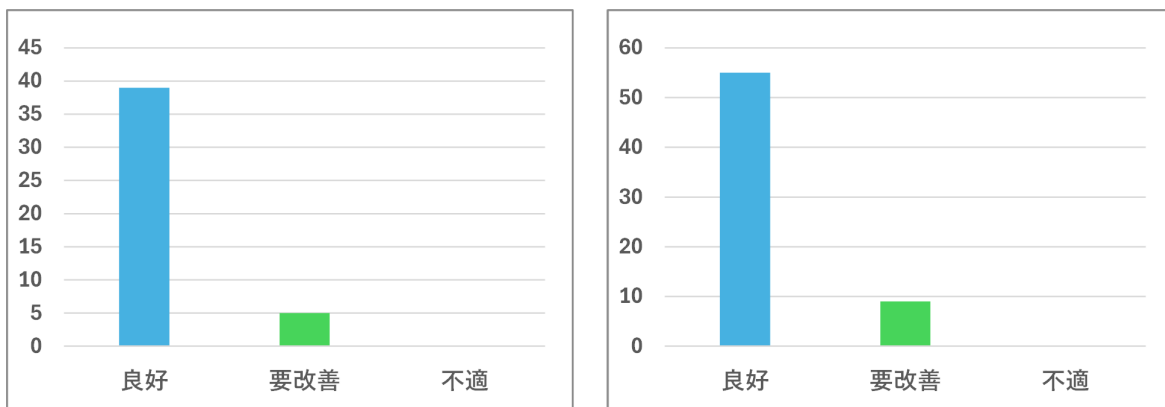


図 79 災害情報と工事情報を受けた際の対応の適切性に関する設問
(左:災害シナリオ時、右:工事区画回避シナリオ時)

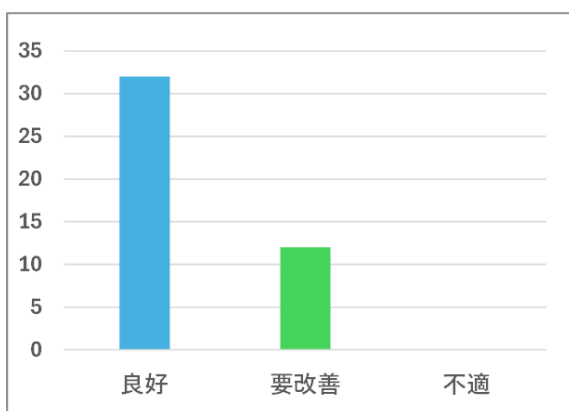


図 80 災害や緊急時を想定した走行に対する安心感に関する設問

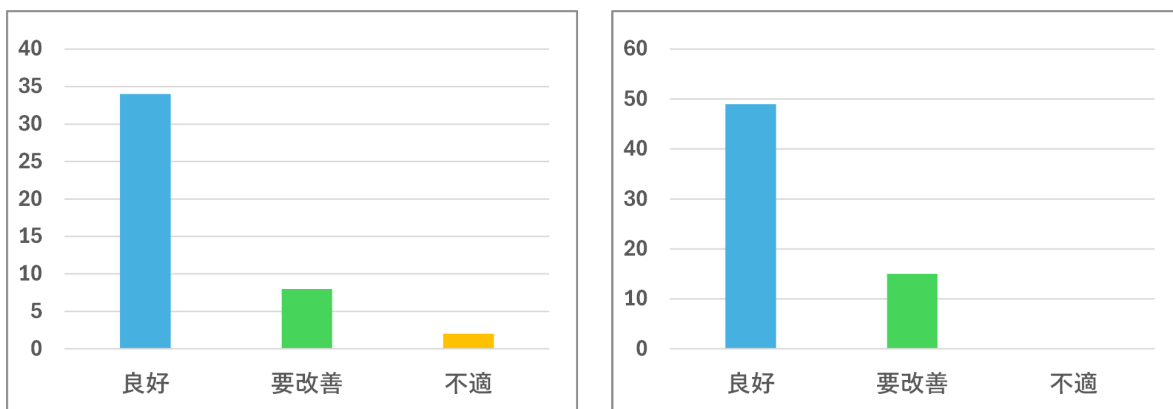


図 81 災害情報と工事情報に関する案内内容の理解度に関する設問

【考察】

本実証では、都市 OS から提供される災害情報と工事情報データについて、交通事業者および一般試乗者の双方を対象としたアンケート結果から、情報が自動運転バスの運行判断および車両制御に概ね適切に反映されていることが確認された。

交通事業者(運転士・遠隔監視員)を対象とした評価では、都市 OS から受信した災害情報と工事情報が運行判断に必要な情報として把握可能であり、停止・減速・ルート変更といった車両制御の判断において実運用上大きな支障は生じていないとの評価が得られた。特に、工事情報を契機とした事前減速

や経路変更といった挙動については、安全性確保の観点から妥当であるとの認識が示されており、都市 OS と車両制御系の連携が、実運用を想定したレベルで機能していることが示唆される。一方で、一部の回答では、第二走行車線に走行車両が存在したことにより手動介入が必要となったケースや、周辺交通状況との関係で制御判断が制約を受けた場面が指摘されている。これらは、災害情報と工事情報そのものの受信精度や伝達遅延に起因するものではなく、実交通環境における制約条件が車両制御に影響を与えた結果であると整理できる。

また、一般試乗者を対象としたアンケートにおいても、災害情報と工事情報を受けた際の自動運転バスの挙動について、多くの回答者が「安全」「概ね問題無し」と評価しており、乗客視点においても、情報に基づく車両制御が安全性を損なうものではないことが確認された。一方で、自由記述では「情報を受けたことが分かりにくい」「事前説明や案内があればより安心できる」といった意見も見られ、情報伝達の“見え方”に関する改善余地が示唆されている。

3) KPI/KGI との比較結果

表 42 ユースケース④における KPI/KGI(2)

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	(1)	災害情報通知に基づく車両の停止、ルート変更通知が自動運転車両で 99%受信できること
	(2)	工事情報データに基づく車両の停止、ルート/車線変更通知が自動運転車両で 99%受信できること
定性評価	(3)	遠隔監視装置のダッシュボードに災害情報を追加し、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを確認する
	(4)	都市 OS から受信した災害情報に基づく車両制御(ルート変更)が適切に行われ、避難時における乗客の安全性に関する評価をアンケートにて確認する
	(5)	工事区間に対して、自動運転バスが安全かつ適切な挙動(車線変更)をとることで、走行における安全性の向上に寄与するか確認する

(1) 災害情報通知が自動運転車両で 99%受信できること【定量評価】

4.4.2 に記載の通り、災害情報通知の自動運転車両側での受信率を確認するため、5 回の計測を実施した。災害情報通知の受信率はいずれの測定でも KPI である 99%以上の受信率を満たす結果となった(表 43)。この結果より、災害情報の通知が自動運転車両まで到達していることが確認できた。

本結果から、実証構成ネットワークを用いた情報伝送は、災害情報のような即時性が求められる有事情報に対しても、高い信頼性を有していると考えられる。一方で、本検証は限定されたエリアおよび条件下での評価であるため、今後は通信環境の変化や走行条件の違いを考慮した検証を行い、より実運用に近い環境での安定性を確認する必要がある。

表 43 災害情報通知の受信率測定結果

	受信数 (件)	送信数 (件)	受信率 (%)
計測1	187	187	100
計測2	206	206	100
計測3	212	212	100
計測4	203	202	99.50738916
計測5	214	214	100

(2) 工事情報通知が自動運転車両で 99%受信できること【定量評価】

4.4.2 に記載の通り、工事情報通知の自動運転車両側での受信率を確認するため、5 回の計測を実施した。工事情報通知の受信率はいずれの測定も 100%であり、KPI である 99%以上の受信率を満たす結果となった(表 44)。この結果より、工事情報の通知が自動運転車両まで到達していることが確認できた。

本結果から、実証構成ネットワークを用いた情報伝送は、工事情報のような道路状況に合わせた連携が求められる情報に対しても、高い信頼性を有していると考えられる。一方で、本検証は限定されたエリアおよび条件下での評価であるため、今後は通信環境の変化や走行条件の違いを考慮した検証を行い、より実運用に近い環境での安定性を確認する必要がある。

表 44 工事情報通知の受信率測定結果

	受信数 (件)	送信数 (件)	受信率 (%)
計測1	201	201	100
計測2	201	201	100
計測3	215	215	100
計測4	221	221	100
計測5	201	201	100

(3) 遠隔監視装置のダッシュボードに災害情報を追加し、システムの操作性やユーザインターフェースに問題がないかを確認する【定性評価】

【実証結果】

4.4.2 に記載の通り、交通事業者の運転士および遠隔監視員を対象としたアンケート(有効回答者数 n=3)の結果、都市 OS から受信した災害情報について、遠隔監視装置のダッシュボード上で運行判断に必要な情報を把握できるかという設問に対して、「有効」の回答者は 2 名(約 67%)であった。また、災害情報の表示内容および視認性について、「良好」の回答者は 2 名(約 67%)であり、実運用を想定した遠隔監視業務において、情報把握や操作に大きな支障は生じない水準であることが確認された。一

方で、「情報の強調表示方法」、「表示項目の優先度」、「災害情報と運行状況との関係性の分かりやすさ」といった点については、2名(約67%)の回答者から改善の余地がある旨の意見が示された。

【考察】

本実証の結果、交通事業者アンケートにおいて、回答者の過半(3名中2名(約67%))が、都市OSから受信した情報を遠隔監視装置上で適切に把握できると評価しており、運行判断を支援する情報基盤として一定の有効性が確認された。これは、運行継続可否や対応方針を判断するための基盤として、都市OSと遠隔監視装置の連携が実運用レベルで成立していることを示す結果であると考えられる。

一方で、少数ながら改善意見も確認されていることから、今後の実装フェーズにおいては、「重要情報の視認性向上」、「緊急度に応じた情報の強調表示」、「ユーザインターフェース設計の最適化」を行うことで、監視業務の負荷軽減および判断精度のさらなる向上が期待される。

(4) 都市OSから受信した災害情報に基づく車両制御(ルート変更)が適切に行われ、避難時における乗客の安全性に関する評価をアンケートにて確認する【定性評価】

【実証結果】

4.4.2に記載の通り、一般試乗者を対象としたアンケート(有効回答者数 n=44)において、災害情報を受信した際の車両の挙動(減速・停車・ルート変更等)および走行中の安全性に関する評価を行った。その結果、6.4.2(2)に示した通り、「良好」の回答者は39名(約89%)、「要改善」の回答者は5名(約11%)、「不適」の回答者は0名(0%)となり、大多数の試乗者が災害情報に基づく車両制御について安全性を体感できたと回答した。

また、自由記述においては、「安心して乗車できた」、「急な挙動は感じなかった」といった肯定的な意見が多く見られた一方で、「実際の災害時を想定すると、事前説明があると安心できる」といった改善意見も確認された。

【考察】

災害情報に基づく車両制御は、試乗者視点においても概ね受容されており、緊急時における乗客安全性確保の観点から有効であることが示された。

今後は、実災害を想定したシナリオ説明や車内案内を充実させることで、乗客の安心感をさらに高める余地があると考えられる。

(5) 工事区間に対して、自動運転バスが安全かつ適切な挙動(車線変更)をとることで、走行における安全性の向上に寄与するか確認する【定性評価】

【実証結果】

4.4.2に記載の通り、一般試乗者を対象としたアンケート(有効回答者数 n=64)において、工事情報を受信した際の車両の挙動および工事区間通過時の安全性に関する評価を行った。その結果、6.4.2(2)に示した通り、「良好」の回答者は60名(約94%)、「要改善」の回答者は3名(約5%)、「不適」の回答者は1名(約2%)となり、多くの試乗者が工事区間における走行について安全性に問題はないと評価した。「不適」と回答した試乗者からは、工事区間において第二走行車線に走行車両が存在したため、手動介入により車線変更が中止されたことに対する指摘が挙げられており、当該状況に対する不安が読み取れた。

【考察】

工事情報に基づく車両制御は、多くの試乗者にとって安全性が確保されていると受け止められており、工事区間通過における有効性が確認された。一方で、周辺交通状況により手動介入が発生したケースについては、制御の限界条件をより明確にし、運用ルールを定めていく必要がある。

4) 成果・課題

【成果】

本実証では、都市 OS を介して取得した災害情報と工事情報を、自動運転バスの運行判断および車両制御に反映する一連の仕組みを実装し、その有効性を検証した。

交通事業者(運転士・遠隔監視員)と一般試乗者を対象としたアンケート結果からは、災害情報と工事情報に基づく車両制御は安全性および運行判断の観点から概ね妥当であるとの評価が得られており、実運用を想定した際の有効性が確認された。特に、都市 OS から受信した災害情報と工事情報が遠隔監視装置のダッシュボードに反映され、遠隔監視員が運行継続可否や対応方針を迅速に判断できること、その判断に基づいて自動運転車両側で停止・減速・ルート変更等の制御が実施されることといった、「情報取得 → 判断 → 車両制御」の一連のフローが成立していることが確認できた点は、本実証の重要な成果である。

また、一般試乗者を対象としたアンケートにおいても、災害情報と工事情報を受信した後の自動運転車両の挙動について、安全性を体感できたとの評価が多数を占めており、車両制御の挙動が利用者視点においても概ね受容されていることが示された。

これらの結果から、都市 OS と連携した外部情報を活用することで、従来は車両単体では把握が困難であった災害情報と工事情報を踏まえた柔軟な運行判断が可能となり、自動運転バスの安全性・信頼性向上に寄与することが確認された。

【課題】

一方で、本実証を通じていくつかの課題も明らかとなった。交通事業者および一般試乗者を対象としたアンケート調査における自由記述の一部では、車両制御時の挙動(特に減速やブレーキ操作)に対する違和感や不安感、また状況説明や案内の分かりやすさについて改善の余地を指摘する意見が見られた。

また、実証環境下では、周辺交通状況(隣接車線の一般車両の存在等)により、安全確保の観点から手動介入が必要となる場面も確認されており、災害情報と工事情報そのものに起因しない外的要因が運行判断や制御結果に影響を与えるケースが存在することが示唆された。この点については、将来的なレベル4自動運転の社会実装を見据え、外部情報だけでなく周辺交通環境を含めた総合的な判断ロジックの高度化が求められる。

さらに、遠隔監視の運用面では、情報表示の優先度設定や視認性、重要情報の強調表示といった遠隔監視画面のユーザインターフェースの改善により、災害時や緊急時における運行判断の負荷を一層軽減できる可能性がある。

今後は、定量的な受信精度の評価結果と併せて、情報提示方法や制御タイミング、利用者への説明手法を含めた総合的な運用改善を進めることが、社会実装に向けた重要な課題であると考えられる。

6.5 ⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証

当該ユースケースは実施していない。

6.6 レベル4の社会実装に向けた検討の結果

6.6.1 運用検証

1) システムの操作性やユーザインターフェースに関する評価(特に遠隔監視員の軽減負担等)

(1) 実施結果

本実証では、協調型自動運転システムと外部連携データを活用した運用性と負担軽減について、遠隔監視員および運転士に対してアンケート調査を行い、システムの操作性やユーザインターフェースに関する有効性を評価した。

まず、監視環境の基盤となる遠隔監視映像の品質については、解像度や明るさ、視認性についてはほとんどの回答者が良好と回答しており、全体的な映像品質としては良好との評価であった。

一方で、一部の意見では、映像の途切れやノイズについては画面の停止時間や途切れが気になる旨や、視野角については車内全体の映像が見られるとよい旨、車外映像について現状では停止線に合わせて停止しているか判断できないため、アンダーミラーと同等の走行範囲が映るとよい旨の改善点が見られた。秋保ルートにおいては、路面の状態がより精細に映るとよりよい旨の意見があった。

システム操作性については、遠隔監視画面の操作方法や画面構成、表示情報を含め、全体として遠隔監視装置の操作性・使いやすさは概ね良好との評価であった。都市OSを経由した、路面凍結情報や災害情報と工事情報の連携においては、全体的に半数以上が「良好」の回答であった。秋保ルートの路面凍結情報の連携に関しては、路面凍結センシング結果は実際の路面状況と照らし合わせて正確であるうえ凍結モードでの減速は機能的であり、運転判断に有効である旨の回答が得られた。

一方で、一部の回答では、更なる高度化の観点において、路面状況の詳細な区分に対応して凍結モードの他にもモードを設け、人間と同様に判断できるような区分があると安全性が高まるのではないかと、という意見が見られた。東部北ルートの災害情報の連携に関しては、遠隔監視画面の表示情報については概ね良好であったが、発展的な課題として、地震、津波、暴風等の多様な災害情報への対応や、進行方向先での事故や火事情報の表示が挙げられた。東部北ルートの工事情報の連携に関しては、工事情報の受信タイミングや受信内容、画面構成は概ね良好であったが、一部の回答では改善点として交互交通や工事区間が連続した場合の表示があるとよい旨の意見があった。

総じて、遠隔監視画面の操作性およびユーザインターフェースに関して、特に路面凍結情報や工事情報の事前把握において、遠隔監視員と運転士の運行判断に一定の有効性を発揮したことが確認された。

(2) 考察

本実証の結果、遠隔監視画面の表示内容や画面構成、表示タイミングの適正化は、レベル4自動運転の実装に必要な遠隔監視の信頼性向上に寄与する示唆が得られた。

まず、中山間地といった条件不利地域でも遠隔監視映像が途切れにくく、車両制御情報が安定して通信可能な通信環境を構築できた点は、改善点は残るものの、協調型インフラ基盤×Cradio やスライミング技術がレベル4自動運転における「常時監視が可能な通信基盤」の成立性において重要な役割を果たしたと言える。

また、路面凍結情報や工事情報と災害情報等の外部データを遠隔監視画面に統合して表示した点も、遠隔監視員の運行判断や遠隔監視業務の負担軽減において、レベル4自動運転の社会実装に向けた改善点の洗い出しを含め、重要な機能であったと言える。

車両単体のセンサでは捉えにくい環境情報を補完する仕組みは、運行可否や走行モード、走行ルート切り替えの判断において妥当性向上につながり、運転士や遠隔監視員の負荷低減に寄与した。秋保ルートでは、路面凍結情報の事前把握が心理的緊張を緩和し、東部北ルートでは、災害情報と工事情報に基づくルート変更の判断に活用できた。

一方で、遠隔監視映像については、車外カメラの視野角の最適化、路面状態の視認性向上車内全体の把握に向けた多視点カメラ構成等、レベル4自動運転の実装に向けた改善余地も明確になった。これらは、遠隔監視機能が運転士の代わりとしてより高い判断精度を求められるレベル4自動運転の社会実装において、今後最優先で改善すべき領域である。

総じて、本実証で構築したシステムの操作性およびユーザインターフェースは、レベル4自動運転の遠隔監視業務において当初要件を満たしたうえで運行しており、レベル4自動運転の実装に向けた遠隔監視員の負担軽減と安全性向上に関する課題点も適切に洗い出すことができた。

今後は、遠隔監視映像の視認性改善やより多視点でのモニタリング等、情報提示含むユーザインターフェースの高度化を進めることで、レベル4自動運転の社会実装に向けた遠隔監視体制の完成度がさらに高まると考えられる。

2) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

(1) 実施結果

本実証においては、協調型インフラ基盤や Cradio、スライミング等の通信技術を活用し、走行エリアの拡大と柔軟な走行による自動運転率向上を目指した。

走行エリアの拡大においては、通信不感エリアを含む秋保ルートでローカル 5G や協調型インフラ基盤×Cradio を活用することで遠隔監視や車両制御に必要な通信環境を整備し、都市 OS から取得した路面凍結情報を基に走行モードの制御を行った。路面凍結情報については、路面状態の判定精度は KPI で設定した 95%を超える 97%以上を記録し、自動運転車両における路面凍結情報の取得率は平均 97.82%と KPI で設定した 92%よりも高い数値を確認した。遠隔監視員に対する定性アンケート結果(有効回答者数 n=2)では、路面状況判断システムにおける路面凍結状況の認識精度を問う設問に関して、半数が「良好」、半数が「要改善」と回答した。「要改善」と回答した回答者からは、「システム上で路面状況は正確に捉えていたが、天候の変わりやすい山間部において、自動運転バスにも搭載し、走行時にも把握できればよりよい」旨の、レベル4自動運転の実装に向けて実用性の高度化を求める意見があった。また、凍結の有無や程度の判定結果が運転判断に活用できるかを問う設問に関しては、半数が「良好」、半数が「要改善」と回答した。「要改善」と回答した回答者からは、「システム上で判別できる水幕や積雪等の詳細な情報に関して、それぞれ閾値を設定し、モードをより細かく設定する等、人間と同様に判断できるような区分があるとより安全性が高まるのでは」というレベル4自動運転の実装に向けて実用性の高度化を求める意見があった。路面状況に応じたアシスト(減速)の妥当性を問う設問に

関しては全員が「良好」と回答し、「安心して乗車できた」「機能的でよかった」旨の評価が得られた。

(2) 考察

柔軟な走行による自動運転率向上においては、スライシングの活用により通信環境の適正化を図ったうえで、災害情報と工事情報の受信率が平均 99%を上回り、KPI として設定した 99%以上の受信が確認された。また、一般試乗者を対象としたアンケート調査では、災害情報と工事情報を受信した際の車両制御の適切性や安全性について、それぞれ約 90%の回答者から前向きな評価が得られた。運転士向を対象としたアンケートでは、災害情報と工事情報の受信後の挙動に関して、一部の回答者からは走行ルート変更後のふらつきや時々ステアリングの大きなブレを指摘する意見があったものの、概ね良好との評価を得られた。

走行エリアの拡大においては、通信不感エリアを含む秋保ルートでローカル 5G や協調型インフラ基盤×Cradio を活用することで遠隔監視や車両制御に必要な通信環境を整備し、都市 OS から取得した路面凍結情報を基に走行モードの制御を行った。秋保ルートでは、路面凍結情報の判定精度と自動運転車両での受信率が KPI を超える数値で安定しているうえ、定性評価の結果からも路面状況の判断の正確性が確保されている評価が確認され、路面状況判定システムは運転判断に十分活用できる可能性が示唆された。以上から、レベル4自動運転の実装において、従来は自動走行が困難であった通信不感エリアを抱える路面凍結リスクのあるエリアでも、通信環境と走行モード制御を活用することで走行エリアが拡大できる可能性が示唆された。これを踏まえ、通信不感エリアにおいては、次年度以降はより安定した通信環境を効率的に構築するため、NTN(非地上系ネットワーク)も含めた協調型インフラ基盤の更なる活用を検討し、レベル4自動運転実装の安心と安全に寄与したい。

柔軟な走行による自動運転率向上においては、都市 OS から受信した災害情報と工事情報を基に走行モードや走行ルートを変更する点において仕組みと環境は安定しており、汎用性の観点においては一定の型化がなされたと言える。ただし、情報取得後の車両の挙動に関しては概ね良好との評価を得られたものの、制御時のふらつきやステアリングのブレが課題として残るため、レベル4自動運転の実装に向けては、対応ユースケースの増加や、走行モードや走行ルートの変更後における自動運転車両制御の精度向上が必要である。凍結路面の走行においても、速度を下げることによる安全性の向上等の効果は見られたが、本来の凍結路面走行では速度の制御だけではなく、アクセルやブレーキの踏みタイミングや操舵についても、凍結路面ならではの自動運転時の走行技術があるため、閉鎖空間にてドライバーテクニックを自動運転走行制御に反映する検証を繰り返す等で、さらに安全性の向上を目指す。

3) データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策

(1) 実施結果

本実証においては、自動運転車両からクラウド(ドコモ MEC)環境までの通信経路として、MEC ダイレクト(閉域網)、au 回線およびローカル 5G(バックホールに Starlink 衛星通信を利用)の 3 系統を併用した。

MEC ダイレクトについては、インターネットを経由しない閉域網で構成されており、外部ネットワークから論理的に分離された通信経路とした。

一方、au 回線およびローカル 5G についてはインターネットゲートウェイを経由する構成であるため、ドコモ MEC 上に配置したファイアウォール(FW)においてホワイトリスト方式を採用し、事前に許可した送信元・宛先・通信内容のみ通信可能とした。

クラウド環境から外部インターネットへの通信については、データ連携基盤(都市 OS)との連携を含む各種外部サービス利用のため通信を許可する構成としたが、外部インターネットからクラウド環境へのアクセスについては、ホワイトリストに登録された通信を除き、全て遮断する設定とした。

FW ログを確認した結果、以下の通りクラウド環境で取得しているグローバル IP アドレス宛での通信試行が多数検知されたものの、全て「deny」として遮断されており、システムへの侵入やサービス影響は確認されなかった。

(クラウド環境で取得したグローバル IP アドレス宛での遮断ログ例)

- ・ deny 211.123.224.168:5366 件
- ・ deny 211.123.224.169:5370 件
- ・ deny 211.123.224.170:5351 件
- ・ deny 211.123.224.171:5737 件
- ・ deny 211.123.224.173:5251 件
- ・ deny 211.123.224.174:5378 件
- ・ deny 211.123.224.175:6086 件

以上より、クラウド環境に割り当てられたグローバル IP アドレスに対する外部からのアクセスが適切に遮断されていることを確認した。

(2) 考察

自動運転バスでは、車両制御、位置情報、周辺環境情報等安全運行に直結するデータを扱うため、クラウド環境に対する外部からの不正アクセスを確実に防止することが重要である。

本実証では、クラウド環境に割り当てられたグローバル IP アドレス宛てに対し、外部から多数の通信試行が発生していたものの、全て FW により遮断されており、クラウド環境がインターネット上から直接侵入されない構成となっていることを確認できた。

また、閉域網である MEC ダイレクトの利用に加え、インターネットを経由する au 回線およびローカル 5G についてもホワイトリスト方式を採用していることから、通信経路の違いによらず一貫したセキュリティレベルを確保できている。

これらの対策により、サイバー攻撃等によって自動運転バスの制御系や情報系システムが影響を受けるリスクを低減できている、本構成は自動運転バスの安全かつ安定した運行を支える有効なセキュリティ対策であると評価できる。

4) 通信システム(路車協調システムや端末を含む。)の維持管理・保守

(1) 実施結果

本実証では、自動運転バスとクラウド(ドコモ MEC)間の通信を構成する通信回線(MEC ダイレクト、au 回線、ローカル 5G(バックホール:Starlink))および車載通信機器、クラウド上の各種システムについて、運用期間中の安定稼働を目的とした監視および保守対応を実施した。

具体的には、以下の運用を行った。

- ・車載通信機器およびクラウド上システムの稼働状況を定期的に確認
- ・通信断や遅延等の異常が発生した場合に備え、ログ確認および切り分け手順を整理
- ・必要に応じて車載通信機器の再起動や通信回線の切り替えを行う運用を想定

実証期間中において、通信システムの致命的な障害や長時間の通信断は発生せず、自動運転バスの走行およびデータ連携に支障をきたす事象は確認されなかった。

また、MEC ダイレクト、au 回線、ローカル 5G の複数回線構成とすることで、通信品質の変動が生じた場合でも、他の回線を用いた通信が可能な構成であることを確認した。

(1) 考察

自動運転バスでは、車両とクラウド間の通信が途絶した場合、運行監視やデータ連携に影響を及ぼす可能性があるため、通信システムの高い可用性と迅速な復旧体制が求められる。

本実証では、複数の通信回線を併用する構成とするとともに、車載機器およびクラウド側システムの稼働状況を継続的に確認する運用を行ったことで、通信システムの安定運用を実現できた。

また、異常発生時の対応手順や再起動対応を想定しておくことで、万一トラブルが発生した場合でも、短時間で復旧可能な体制を整備できている。

以上より、本実証で構築した通信システムの維持管理・保守体制は、自動運転バスの継続的かつ安全な運行を支えるうえで有効であると評価できる。

6.6.2 効果検証

1) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化

(1) 実施結果

本実証では、秋保ルートおよび東部北ルートにおいて、通信システム等を活用した遠隔監視と運行判断のもと、自動運転バスの運行を実施し、手動介入の発生状況および運行停止への影響を確認した。

東部北ルートでは、複数の公衆キャリアネットワークを用いた通信環境下において運行を行った結果、遠隔監視に必要な映像・走行情報は安定して取得され、通信断や通信品質の著しい劣化を要因として運行停止に至る事象は確認されなかった。手動介入は、主として周辺交通状況や安全確保を目的とした運行判断に基づくものであり、通信システムの不具合を直接の要因とするものではなかった。

秋保ルートでは、複数の公衆キャリアネットワークに加え、ローカル 5G を組み合わせた通信構成のもとで実証を実施した。運行中、工事区間の開始・終了位置が事前情報と異なり、規制範囲が明確でない状況が確認されたケースにおいては、安全確保を優先し、運転士の判断により手動介入が行われた。こ

これらの手動介入は、通信断や通信品質低下を起因とするものではなく、実走行環境における工事情報の不確実性への対応として実施されたものであった。

以上より、両ルートにおいて、通信システム等の運用により遠隔監視および運行判断は継続可能な状態が維持され、通信起因による長時間の運行停止は発生していないことが確認された。

(2) 考察

本実証結果から、通信システム等を活用した遠隔監視・運行判断の運用により、レベル4自動運転において求められる運行継続性の確保に一定の効果があることが示された。特に、東部北ルートおよび秋保ルートのいずれにおいても、通信断や通信品質劣化が直接的な要因となる運行停止が確認されなかった点は、通信基盤としての有効性を示す結果である。

一方で、秋保ルートにおいて確認された手動介入事例からは、通信システムの有無や高度化のみでは対応が困難な課題が存在することも明らかとなった。具体的には、工事区間の位置や規制内容が事前情報と乖離している場合、通信が確保されていても、安全確保の観点から人による判断・介入が必要となる。

これらの結果は、レベル4自動運転の社会実装に向けて、通信システム等の安定運用が重要な前提条件である一方、工事情報や規制情報の即時性・正確性を含む周辺情報連携の高度化が、手動介入回数や運行停止時間のさらなる低減に向けた重要な要素であることを示唆している。

2) 自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

(1) 実施結果

本実証では、秋保ルートおよび東部北ルートにおいて、路面凍結情報、災害情報と工事情報、通信状況を連携した協調型自動運転を実施し、安全性および走行円滑性の観点から以下の結果を得た。秋保ルートについては、路面凍結と積雪に応じた安全走行の実現と通信品質の維持と遠隔監視の安定化について示す。路面凍結と積雪に応じた安全走行の実現については、下記の通りである。

- 近赤外線レーザ、路面温度、露点等複数センサを用いた路面判定の結果、6分類(乾燥路、湿路、湿潤路、シャーベット、積雪路、凍結路)の判定精度は95%以上を達成した。
- 凍結判定を受信した車両では、遠隔監視装置を経由した「凍結モード」への切り替えが適切に行われ、減速走行によるスリップ発生は確認されなかった。
- 路面判定データは1秒周期で遅延なく車両・監視装置へ伝送され、速度調整の判断に必要なリアルタイム性が確保された。

また、通信品質の維持と遠隔監視の安定化については、下記の通りである。

- 複数キャリアのグリゲーション+ローカル5G利用により、秋保ルート全域のエリアカバー率は92%を超過し、途切れの少ない映像伝送を実現した。
- 東部北ルートでは大規模イベント開催時の輻輳環境下においても、スライシング適用時は20Mbps前後のスループットを安定的に維持し、遠隔監視映像においても大幅な品質低下は発生しなかった。

- AIによる白杖検知では、90%以上の検知精度を確認した。

東部北ルートにおいては、災害情報と工事情報に応じた車両制御について下記の通り示す。

- 一般試乗期間において、工事情報を受信した走行は18回、災害情報を受信した走行は12回行った。
- 災害情報と工事情報ともに、車両へのデータ受信成功率は99%超を維持した。
- 都市OSから連携された工事情報に基づき、自動運転車両は走行中に自動的に車線変更を実行したが、その際、ステアリングオーバーライド率(ハンドル操作の手動介入率)が約89%(16/18回)、手動運転率が約11%(2/18回)であった。

災害情報を受信したケースでは、車両は事前に設定した避難ルートへの切り替えを行い、設定されたルートを100%通り、安全な停止場所までの走行を実施した。

(2) 考察

本実証では、自動運転車両単体のセンシング能力に加えて、通信基盤および都市OS等の外部データ連携を組み合わせることで、「自動運転車両が自律的に危険を予見し、適切に対応する」ための協調型自動運転の実効性を確認できた。特に秋保ルートにおいては、路面凍結や積雪といった自然環境起因のリスクを、車載センサとMEC経由での路面状況データ配信により正確に把握できたことで、人的介入を必要としない走行モード切り替えが可能となり、走行中のスリップリスクを大幅に低減できた。これは、冬季や中山間地等、これまで自動運転の適用が難しいとされてきた地域において、外部データを活用することで運行可能性が広がることを示している。

また、秋保ルートと東部北ルートの両ルートで実施した通信品質向上の取り組みにより、遠隔監視の安定性が確保されたことも重要な成果である。マルチキャリアのアグリゲーション、ローカル5G、スライミングといった複数の技術を統合した結果、通信途絶や輻輳による映像品質低下が抑制され、遠隔監視員が常時安定した情報を得られる環境が整った。これは、遠隔監視型のレベル4自動運転において必須となる「常時・高精度・低遅延」での監視の成立に直結しており、技術的な妥当性が確認できたと言える。

さらに、東部北ルートでは、都市OSと連携した災害情報と工事情報に基づく車両制御が実証でき、外部環境の変化に応じたルート変更や安全停車が遅延なく実行されることを確認した。これにより、自動運転車両が自車センシングに頼るだけでなく、地域インフラが保有する情報を取り込むことで、より広域的・事前的に危険を回避できることが明らかとなった。これは、運転士でも判断が難しい状況において、協調型自動運転が交通全体の安全性と円滑性向上に寄与し得ることを示すものである。

総じて、通信環境、外部データ、路面センシングの三層構造により、車両側が従来よりも高度な判断を行い、安全かつ円滑に走行するための基盤が構築できた。これらの成果は、地域交通における自動運転の適用範囲を拡大すると同時に、複雑な都市・自然環境においてもレベル4自動運転の社会実装に向けた大きな前進となると考えられる。

3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

(1) 実施結果

東部北ルートでは、工事情報に加え、災害発生を想定した情報連携のユースケースについても実証を行った。都市 OS を介して共有される災害関連情報を遠隔監視環境で把握したうえで、走行を実施し、災害情報の存在下においても、遠隔監視による状況把握と判断により、指定避難所への避難を実施した。これにより、通信システム等を通じて災害情報を共有し、遠隔監視員がその内容を踏まえて運行判断を行うことで、非常時を想定した状況下においても、走行継続や対応判断が可能であることが示された。

一方、秋保ルートにおいては、路面の凍結や積雪状況に応じて、車両側の制御(減速、走行モード切り替え)を行うユースケースについても実証を行い、路面状況に応じた柔軟な車両挙動制御が可能であることを確認した。

以上より、通信システム等を活用した情報連携および遠隔監視体制のもとで、災害情報、工事情報、ならびに路面状況といった外部環境の変化に応じた運行判断や車両制御を行いながら、走行を継続できることが確認された。

(2) 考察

本実証結果から、通信システム等を活用した情報連携および遠隔監視体制は、自動運転バスの運行において、外部環境の変化に応じた柔軟な運行判断を可能とする重要な要素であることが示された。

東部北ルートにおいては、災害発生を想定した情報連携のユースケースにおいて、都市 OS を介して共有された災害関連情報を遠隔監視員が把握し、走行を継続した。この結果は、災害情報を含む外部情報を通信システム等により共有することで、状況に応じた運行判断が可能となることを示唆している。

また、秋保ルートにおいて確認された路面凍結や積雪状況への対応事例からは、通信システム等を通じて遠隔から現地状況を把握し、必要に応じて減速や走行モード切り替えといった対応を選択できる運用の有効性が示された。これにより、事前に全ての条件を確定できない状況下においても、運行を継続しながら安全性を確保する運用が成立することが確認された。

これらの結果は、通信システム等による支援が、単に通信の安定性を確保するための手段に留まらず、運行判断の柔軟化を通じて、不要な運行停止の回避や影響時間の最小化に寄与し得ることを示している。結果として、利用者にとっての移動の継続性が確保され、交通サービスとしての利便性向上につながる可能性がある。

一方で、工事区間情報や災害情報、路面状況に関する情報の精度や即時性が十分でない場合には、通信システム等が確保されていても、人による判断や介入が必要となる場面が存在することも明らかとなった。今後の社会実装に向けては、通信システム等の高度化と併せて、外部情報の精度向上や提供方法の改善を進めることで、より柔軟かつ効率的な運行が可能になると考えられる。

4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

(1) 実施結果

【初期コスト・ランニングコストの現時点での概算】

本実証の初期コスト・ランニングコストについては、実施計画時と同様に下記の通りである。

表 45 ユースケース①②④「遠隔監視、安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送における自動運転システム」を構築するための必要経費

予算費目	合計	積算根拠
1. 人件費		
(1) ユースケース①:遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保	1,810 万円	通信システム環境構築、通信システム運用 プロジェクトマネジメント、報告書作成
(2)ユースケース②:遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保	2,385.7 万円	通信システム環境構築、通信システム運用 運行監視システム環境構築 プロジェクトマネジメント、報告書作成
(3)ユースケース④:安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装	2,223.8 万円	自動運転バス調達、データ連携車両制御 都市 OS 連携構築、通信システム環境構築 通信システム運用
(4) ユースケースに共通する環境構築に要する経費	4,364.4 万円	自動運転バス調達・走行業務 協調型インフラ基盤、AI 検知システム
(5) その他共通経費	1,875.2 万円	視察会、各種報告会 プロジェクトマネジメント、報告書作成
2. 事業費		
(1)物品費		
①借料	2,142 万円	自動運転バス車両、遠隔監視設備、車載通信機器 V2N/N2V 各種端末車載用部品、燃料費
②消耗品費	62.5 万円	
(2)旅費・交通費		
①業務従事者旅費	282.5 万円	現地調整、試験対応 通信システム利用
②通信運搬費	383 万円	
3. 一般管理費	1,108.1 万円	プロジェクト運営、その他
4. 外注費		
(1)外注費		
①普及啓発活動検討支援	200 万円	通信システムに係るリサーチ等の支援業務
②回送(自動運転バス車両)	40 万円	自動運転バスの回送業務

③V2N/N2V用 各種端末の車載施工	30万円	車載器の設定、設置工事
④ネットワーク構築作業費	400万円	Cradioの構築作業費
⑤車載用路面センシングシステム開発	1,113.3万円	車載用路面センサシステム開発
⑥電波伝搬測定 通信状況測定作業	320.1万円	電波伝搬測定業務支援
⑦車両ラッピング	75万円	自動運転車両のラッピング作業費
⑧予約システム	28万円	インターネット上での試乗予約システムの提供
⑨都市 OS データモデル作成	210万円	データ連携のための設定支援業務
⑩車載器設定,運行監視システム開発費用	2,394.5万円	車載器の設定、運行監視システム開発
⑪通信用基地局建設工事	617万円	遠隔監視システムライセンス提供およびコーディング
⑫通信機器 ギガらく5G セレクト 一式	826.1万円	ローカル5G 基地局建設工事
⑬車載器の環境構築	844.3万円	高信頼通信環境の構築支援
小計	23,735.5万円	
5. 消費税額および地方消費税額	2,373.5万円	
合計	26,109万円	

※記載の金額は実証中における参考価格であり実装時は諸条件に応じて大きく変動する可能性がある。

※設計・設置・運用に係る人件費等は別途必要。

【コスト負担の在り方・コスト低減策に関する検討】

本実証における初期コストおよびランニングコストは、通信基盤構築費、車両関連設備費、遠隔監視設備、都市 OS 連携開発、各種センサおよびシステム統合費が主な構成要素であり、特に通信の冗長化構成および実証環境特有の機器構成がコスト増加要因となっている。一方で、社会実装を見据えた場合、以下の観点においてコスト低減の可能性が確認された。

第一に、通信基盤および関連設備の共用利用(インフラ共用化)である。ローカル 5G 設備、基地局、MEC、映像監視設備等を単独用途ではなく、他のサービスや地域インフラと共用することで、初期投資および維持管理費の抑制が期待できる。また、協調型インフラ基盤や複数回線統合技術を活用することで、専用回線への依存度を低減し、公衆網との組み合わせによる通信コストの最適化が可能であることを確認した。

第二に、機器およびシステムの標準化・量産化による単価低減である。現段階では試験機材や個別仕様が多くコストが高止まりしているが、複数地域での横展開や仕様統一により、センサ機器、通信装置、車載システムの調達単価および保守費の低減が見込まれる。

以上より、本実証においては、単純な機器費削減にとどまらず、通信基盤の共用利用、システム標準化、量産効果の活用を組み合わせることが、中長期的なコスト低減および持続的な社会実装に向けて有効であるとの整理に至った。

(2) 考察

ユースケース①②では、中山間地域等の通信不感地帯において、マルチキャリアでの回線を活用することで、単一のキャリアでの新たな基地局の増設等をせず、エリアカバー率を拡大することができた。

他設備において、本年度はローカル 5G を活用しているが、次年度以降は NTN を活用することでより広範囲を省設備・省メンテナンスでの対応が可能になると考察する。

ユースケース④では、凍結情報取得のための車載センサをマグネットで取り付け可能なタイプで設置しているため、他地域・車両における汎用性を高めている。また、センサ自体のコスト低減にも寄与している。

6.7 レベル4社会実装に向けた考察

本実証では、仙台市の中でも積雪や路面凍結が発生しやすく通信不感エリアが存在する中山間地、災害対策が必要となる臨海部、通信需要が集中する高輻輳地といった、自動運転の実装において課題を抱える環境を対象としてレベル4自動運転の社会実装に必要な通信の安定性、外部データ連携、遠隔監視、安全支援および運用性について検証を行った。その結果、路面凍結時、災害発生時、工事区画回避シナリオ時において、通信基盤と都市 OS から配信されるデータを組み合わせた高度な運行管理手法の有効性が確認され、仙台市におけるレベル4自動運転の実装に向けた技術的可能性が示された。

通信技術面では、協調型インフラ基盤や Cradio、スライシングの活用により、不感エリアや高輻輳地でも遠隔監視や車両制御に必要な通信環境が保たれ、全体的な通信の安定性は有意に改善した。秋保ルートでは、協調型インフラ基盤と Cradio の活用によって複数キャリア回線とローカル 5G を適切に統合することで不感エリアにも対応し、一部途切れはあったものの、遠隔監視映像を連続して取得できる環境が形成された。東部北ルートでも、輻輳地でもスライシングにより優先帯域を確保して全体的な通信環境を整えることで、制御通信と遠隔監視映像の伝送を安定的に維持できた。これらはレベル4自動運転の実装に不可欠な通信の常時接続性確保の観点から、不感エリアや高輻輳地の課題を抱える地域においても自動運転に必要な通信確保が可能であることを示しており、重要な成果と言える。

外部データ連携については、都市 OS を介して取得した路面凍結情報、災害情報と工事情報を車両制御に反映することで、車載センサのみでは捉えきれない環境変化に対応した走行判断が可能となった。秋保ルートでは、システムにおける凍結路面時の路面状況判定や走行モード切り替えが妥当であることを確認し、東部北ルートでは災害情報や工事情報に基づく減速・停止やルート変更の判断・実行が概ね適切に行われた。一般試乗者を対象としたアンケートでも概ね良好との回答を得ており、地域特性を踏まえた柔軟な運行判断プロセスの構築可能性が示された。遠隔監視および安全支援では、通信品質の向上により遠隔監視映像と車両制御情報の伝送が大きな問題なく両立され、遠隔監視員による安全確認がより確実となった。さらに、白杖検知では AI 解析の活用により、多様な利用者への安全配慮を高める仕組みも有効性が確認された。

一方で、改善の余地も明白である。通信品質について、不感エリアではローカル 5G と協調型インフラ基盤×Cradio によって通信環境に改善が見られたものの、一部区間では短時間の通信遅延やスループット不足の課題が残った。これに関して、通信資材やコスト効率を両立しながら、より安定性の高い衛星通信を併用する等の通信環境の更なる強靱化の観点で改善余地を確認した。また、アプリケー

ション側の挙動により映像ビットレートが変動する場面もあり、再接続処理や画質制御の最適化が課題として確認された。外部データ連携においては、一部試乗者から車両制御の前後挙動に関する情報のより分かりやすい提示や、急な減速・ブレーキ等の挙動に対する心理的不安が見られ、社会受容性を高める観点を含め、ユーザインターフェースや制御時の挙動、その説明に関する改善が課題として確認された。さらに、白杖検知における AI カメラにおいては、日照環境によっては一時的に検知制度が不安定になる事象が確認され、アラート発報の遅れにつながる可能性がある点が、安全確保の観点から認識設定の調整が改善余地として確認された。自動運転自体においては、周辺の交通状況による手動介入に関する改善点も確認されており、歩行者や周辺車両の挙動を踏まえた判断ロジックの高度化が求められる。

以上より、本実証はレベル4自動運転の成立に必要な通信・外部データ連携・安全支援技術の有効性を示すとともに、社会実装段階で解決すべき課題を技術面、運用面、事業面から明確にしたものである。

今後は、これらの課題を解決しながら、より安全で汎用性の高い自動運転の実装を目指し、継続的な技術開発と運用改善、関係者間連携の強化を進めることで、仙台市におけるレベル4自動運転の早期実装と持続可能な地域交通サービスとしての確立が期待される。

7. 本実証の総括

7.1 本実証の成果・課題

本実証は、都市部と中山間部を併せ持つ仙台市において、安定的な通信環境を前提とした遠隔監視が必要であるレベル4自動運転の実用化に向け、通信安定性の確保、周辺環境情報の連携、安全性の評価、利用者受容性の把握を目的として実施されたものである。

【成果】

本実証は、仙台市における中山間地および臨海部を対象として、レベル4自動運転の社会実装に必要な通信安定性確保、周辺環境データの連携活用、遠隔監視・制御の有効性検証を体系的に実施した点に大きな意義がある。複数キャリア回線とローカル 5G、協調型インフラ基盤×Cradio による回線統合を組み合わせることで、従来は通信不感地帯や輻輳環境で課題となっていた瞬断や帯域不足に対して、実効的な改善効果が確認された。特に秋保ルートでは、中山間地特有の不感エリアを局所的なローカル 5G 展開によって補完し、遠隔監視映像の安定取得と制御指示の即時反映が可能であることが確認できた。東部北ルートでは、イベント発生等を想定した高輻輳状態への耐性を、ネットワークスライシングによる帯域優先制御で確保し、自動運転バスが必要とする制御系通信を遠隔監視と良質しながら安定的に維持できることを示した。

周辺環境情報活用の観点では、都市 OS と自動運転システムの連携に一定の成果が見られた。秋保ルートでは事前に路面凍結センサによる路面センシングを行い都市 OS へ連携し、走行時には都市 OS を介した路面状況情報の配信を踏まえて路面の凍結・積雪状態に応じた走行モード制御の実効性を検証した。東部北ルートでは、災害情報と工事情報を都市 OS 経由で自動運転車両へ連携し、走行ルートの変更や車線変更に活用することで、外部データによって地域特性に適応した高度な安全確保が可能となることを示した。こうした外部データ利活用は、車載センサ単独では把握困難な状況を補完し、レベル4自動運転の社会実装における安全性向上策として一定の有効性が示唆された。

また、遠隔監視員および一般試乗者を対象としたアンケート結果からも、走行制御の滑らかさ、車体の揺れの少なさ、停止・発進の自然さ等、乗り心地に対する肯定的評価が多数得られ、一定の安心感が保たれていることが確認された。さらに、白杖検知については、エッジおよび遠隔 AI 解析のいずれも高い検知精度を保持し、視覚障害者の支援につながる有効性が確認された。技術的には、従来から課題とされていた中山間地における通信の不安定性に対し、複数回線統合による冗長性確保が効果を発揮した点も大きな成果である。

総じて、本実証を通じて得られた成果としては、(1)通信基盤技術の適用による遠隔監視と車両制御の信頼性向上、(2)都市 OS 等外部データとの高度連携による安全性向上、(3)AI 検知の有効活用による運行支援の高度化、(4)利用者視点での安心・快適性の確認、(5)中山間地を含む多様な走行環境に対する適応可能性の提示、という点に整理され、レベル4自動運転の社会実装に向けた有用な知見を提供するものとなった。

【課題】

本実証を通じて得られた知見の一方で、レベル4自動運転を安定的かつ持続的に社会実装するために解決すべき課題も明確になった。

通信技術面では、秋保ルートにおける複数キャリア回線の統合やローカル 5G の導入によって、一回線の場合に比べて明確な改善は見られたが、受信ビットレートにおいては一部不感エリアで落ち込みがみられ、KPI である平均 6Mbps を常時維持するには至らなかった。遠隔監視では、数秒程度の映像粗さが発生する場面があり、走行判断に影響しないものの、レベル4自動運転の運行に求められる常時高精細な認識情報の確保にはさらなる運用最適化が必要である。また、東部北ルートにおける混雑時の帯域確保についても、スライシングの適用範囲や動的制御の精度向上が今後の課題となる。

AI 白杖検知については、強い逆光・夜間照明・路面反射・天候変化により、検知精度が一時的に低下する可能性が確認された。遠隔側での AI 解析は、エッジ処理と比較してわずかに精度低下が見られ、重要な場面での判断遅延リスクにつながる可能性がある。今後は画像伝送品質の安定化や、AI モデルのロバスト性向上が必要である。

都市 OS 連携についても、実走行環境ではデータの即時性や確実性がより厳しく求められる。今回の実証では災害情報と工事情報を活用できたが、交通密度変化、対向車・追従車の挙動、歩行者の挙動変化、駐停車車両回避等、動的に変化する周辺環境の反映には課題が残った。結果として、一部区間では手動介入が必要となり、完全自律走行の実現には、外部データと車載センサを統合的に判断できる高度アルゴリズムの開発やそれを支える通信環境やセキュリティの構築等、更なる発展的な取り組みが必要である。

利用者視点では、減速タイミングのばらつきや、工事区画回避シナリオ後のハンドル挙動に違和感があるとの意見があり、制御品質の一貫性と説明性が求められる。また車内案内の聞き取りづらさ、モニタの設置位置や表示情報の分かりにくさ等、HMI における改善点も明らかとなった。特に、高齢者や観光客を意識した、誰にとっても分かりやすいユーザインターフェース設計が求められる。

中山間地での自動運転走行に関しては、依然として通信が不安定な区間への対応が必要であり、ローカル 5G に加え、衛星通信 (NTN) 等の安定した複線の通信基盤の導入が今後の検討事項となる。冬季路面对応の高度化に向けては、路面の凍結状態に加え、さらに詳細な路面状況区分や積雪状態等の把握やドライバーテクニックの自動運転システムへの反映等、車両制御の安全性向上に改善余地が見られる。

以上の課題を踏まえると、社会実装に向けては、(1)通信基盤のさらなる最適化、(2)外部データ・車載データ統合制御の高度化、(3)AI 検知の信頼性向上、(4)車内 HMI の改善、(5)多様な環境に対応する冗長的運行基盤の構築が求められると整理する。これらは、本実証を通過点とし、レベル4自動運転の社会実装に向けた次段階へ進むための重要な示唆を提供するものである。

7.2 社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性

本実証の走行実績および課題検討を踏まえ、「①自動運転分野」「②通信分野」「③ソリューション(遠隔監視)分野」「④ソリューション(都市 OS 連携)分野」の4分野を軸に、2025 年度から 2027 年度までの、社会実装へ向けたステップを本市が直面する技術的・運用的課題に沿って体系的に整理し、レベル4自動運転の社会実装に向けた取組の方向性を示す。

表 46 社会実装に向けたロードマップ(2025～2027 年度)

年度	自動運転分野	通信分野	ソリューション(遠隔監視)	ソリューション(都市 OS 連携)
2025 年度	<ul style="list-style-type: none"> ・走行環境(凍結・急勾配・視界不良)の課題抽出・区分設定。 ・低難度/高難度区間の ODD 整理。 ・走行安定性・制動挙動に関する基礎データ収集。 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数キャリア 4G/5G の品質変動の把握。 ・ローカル 5G の高安定映像伝送実証。 ・Cradio による品質予測・動的切り替えの評価。 	<ul style="list-style-type: none"> ・1:1 遠隔監視成立性の確認。 ・多視点映像・走行情報の取扱要件整理。 ・運行判断補助となる AI 検知の初期検証。 	<ul style="list-style-type: none"> ・凍結・工事・災害情報の都市 OS 連携の成立性確認。 ・車両データ提供の運用要件整理。
2026 年度	<ul style="list-style-type: none"> ・低難度区間でのレベル4申請準備。 ・急こう配・急カーブにおける技術的課題の対応策検討 ・凍結路面走行ドライバートクニックの自動運転システムへの反映 ・路車協調構成(死角補完)の検討開始。 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数キャリア統合の高度化と冗長化。 ・NTN(HAPS 等)導入に向けた要求条件整理。 ・イベント時等の輻輳対策として、ネットワーク優先制御(Mobile QoS)やスライシングの適用範囲を整理。 	<ul style="list-style-type: none"> ・監視手順・責任範囲の明確化。 ・映像・アラート体系の設計。 ・複数車両監視に向けた業務要件定義。 ・統合監視を前提とした N:M 想定運用要件を整理。 	<ul style="list-style-type: none"> ・都市 OS への車両データ常時連携体制の構築。 ・外部データを踏まえた走行判断ロジック形成。
2027 年度	<ul style="list-style-type: none"> ・2026 年度区間でのレベル4許認可取得。 ・天文台～秋保大滝間の自動運転率向上。 ・他エリア展開の前提条件整理。 ・採算性向上に向けた観光観点での施策検討。 	<ul style="list-style-type: none"> ・広域通信構成(ローカル 5G+複数キャリア + NTN)の統合運用。 ・災害時通信の継続性強化。 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数台監視体制の試行運用。 ・事業性確保に向けた監視業務標準化。 	<ul style="list-style-type: none"> ・都市 OS による広域最適化の高度化。 ・道路維持管理(除雪・工事)との連携深化。 ・市内の MaaS 基盤(GTFS)等との連携による API 活用・横展開の可能性を検討。

2026～2027 年度に重点的に取り組むべき事項(詳細)

(1)自動運転分野:走行環境に応じた段階的高度化

2026～2027 年度にかけては、秋保ルート全体におけるレベル4自動運転の実装を見据え、急こう配や急カーブ等、走行環境の難易度に応じた段階的な高度化を進める。走行ルートにおいては、2025年度の既存実証ルートを仙台市天文台まで延伸のうえ愛子駅～仙台市天文台まで拡大し、走行環境の難易度に応じてルートを「愛子駅～仙台市天文台ルート」と「仙台市天文台～秋保大滝ルート」に二分する。仙台市天文台～秋保大滝ルートについては、秋保地域特有の厳しい走行環境を踏まえた技術検証と運行判断の高度化を主軸に取り組む。

仙台市天文台～秋保大滝ルートは、急勾配・急カーブが連続する地形条件に加え、冬季の路面凍結や落葉、通信条件の変動、災害時対応といった課題が重なる区間であり、一般的な市街地とは異なる運行判断が求められる。このため、車載センサによる認知に加え、路側インフラや外部情報を組み合わせた複合的な認知・判断・制御モデルの構築が不可欠となる。

2026 年度は、路車協調による死角補完、周辺環境情報を活用した減速・停止判断等、安全な運行制御の設計と検証を進める。併せて、通信条件が不利となる区間や環境変化が頻発する状況下においても、安定した運行判断が可能となるよう、運行可否判断の考え方や運用上の制約条件について整理を行う。

2027 年度には、これらの検証成果を踏まえ、仙台市天文台～秋保大滝ルートにおいてレベル4自動運転の実装を目指し、走行安全性を最優先としながら運行頻度や運行時間帯等の運用条件についても検討を進め、秋保地域の特性に即した形で、段階的に実装可能な運行体制の構築を図る。

一方、愛子駅～仙台市天文台ルートについては、秋保ルート全体の基盤となる区間として、2026 年度における走行実績の着実な積み上げと運行設計領域(ODD)の具体化を進める。本区間は、道路幅員や交通量、勾配条件等の観点から比較的安定した走行環境を有している。レベル4自動運転の実装に向けて、2025 年度に取得した凍結判定、制動挙動、走行安定性等の基礎データを踏まえ、実環境に即した自動運転設計の精緻化を進める。また、長期運行によってレベル4認可に向けた申請手続にも着手する予定である。

(2)通信分野:高信頼通信の段階的拡張と統合運用

2026 年度は、秋保ルートで実証したローカル 5G の高安定性と、複数キャリア回線の品質変動特性を踏まえ、地域特性に応じた冗長化構成を高度化する必要がある。特に中山間地においては、地形影響や季節要因により通信品質が不安定になりやすく、複数のネットワークを組み合わせることで、映像伝送の途切れや遅延を最小限に抑えることが求められる。2025 年度に実施した協調型インフラ基盤×Cradio による品質予測・制御を基に、2026 年度は複数キャリアの最適切り替え条件を整理するとともに、NTN(HAPS 等)との組み合わせによる安定性向上を図る。また、イベント時等の輻輳対策として、ネットワーク優先制御(Mobile QoS)やスライシングの適用範囲を整理し、必要帯域の確保に向けた検討を進める。

2027 年度には、NTN(HAPS 等)による広域カバレッジの活用を含めた多層的通信構成の統合運用を進め、災害時においても通信断のリスクを最小化する高信頼通信基盤の構築を目指す。仙台市の地勢的特性を踏まえると、通信対策は自動運転の安全性確保に直結する要素であり、特に遠隔監視や外部データ連携を安定的に運用するためには、多層化された通信システムの確立が不可欠である。これにより、2027 年度以降に見据えるレベル4自動運転の運行を支える強靱な通信基盤の形成を目指

す。

(3)ソリューション(遠隔監視)分野:複数車両監視体制の確立

2026年度においては、遠隔監視員が適切に車両の状態を把握し、安全に運行管理を行うための監視項目・対応フロー・責任分界の明確化を進める必要がある。本市の走行環境では、中山間地での通信変動、観光地特有の歩行者動線変化、降雪・凍結による車両挙動の変動等、多様な要因が遠隔監視の負荷に影響を与える。2025年度の1:1監視の実証結果を踏まえ、2026年度は映像・アラート管理体系の標準化、異常検知時の対応手順の整備等、運用面の基盤づくりを進める。併せて、統合監視を前提としたN:M想定運用要件を整理し、複数台監視におけるリスク対応や判断手順の標準化を進める。

2027年度には、複数車両を同時に監視する体制の試行運用に着手し、監視業務の効率化と事業性確保に向けた標準化を行う。本市の地理的条件を踏まえると、複数車両の同時運行は将来的に不可欠であり、運行管理者の負荷軽減と、安全性を損なわない適切な監視体制が求められる。本年度においては、複数車両同時監視におけるリスク、応答時間、アラート処理の優先順位等、実運用に必要となる要素を包括的に評価し、長期的な事業運用モデルの確立につなげていくことが重要である。

(4)ソリューション(都市 OS 連携)分野:外部データ統合による走行最適化

2026年度は、車両側で取得したセンシングデータと、都市 OS を通じて取得できる工事情報・災害情報・道路管理情報等の外部データを常時連携させ、走行判断に反映するためのロジックを構築する。本市では、特に冬季の凍結・降雪による道路環境の悪化や、観光地特有のイベント時混雑等、時期によって大きく変動する道路状況が存在するため、外部データを統合した走行判断が重要性を持つ。

2027年度には、都市 OS 上でのデータ統合をさらに進め、道路維持管理(除雪計画・工事計画)と自動運転運行を連動させた広域的な交通最適化へと発展させる。これにより、レベル4自動運転の実装に留まらず、道路管理者や関係機関との協働による市全体の交通マネジメント高度化が期待される。特に秋保地域のような中山間地では、冬季の気象条件変化に応じた除雪判断が自動運転運行に大きく影響するため、都市 OS を活用した予測的管理が不可欠である。なお、市内の MaaS 基盤(GTFS)等との連携による API 活用・横展開の可能性については、都市 OS の標準的モジュールを用いながら検討を進める。

(5)発展性:市域全体および広域展開に向けた取り組み

本市におけるレベル4自動運転の社会実装は、単に一部ルートでの運行に留まらず、市域全体の公共交通の維持確保・利便性向上に向けた基盤整備と位置づけられる。低難度区間での早期実装を起点として、中山間地・沿岸部・都市部といった多様な環境に対応できる運行モデルを確立することで、他自治体に先駆けた先行的事業化地域としての役割を果たすことが期待される。

また、都市 OS を活用したデータ連携は、隣接自治体や広域的交通計画との連動にも資するものであり、将来的には広域の移動需要や災害対応を見据えたモビリティ基盤の形成につながる。これらの取り組みを通じて、本市は東北地域における自動運転実装の中核的役割を担うことが可能であり、レベル4自動運転の持続的な事業展開に向けた先進的モデルを構築していくことが求められる。

8. 参考(アンケートの設問一覧)

東部北ルートと秋保ルートにおいて、遠隔監視員を対象としたアンケートと一般試乗者を対象としたアンケートの設問をそれぞれ下記に示す。

8.1 東部北ルートにおけるアンケート設問

8.1.1 遠隔監視員を対象としたアンケート

表 47 東部北ルートにおける遠隔監視員を対象としたアンケート設問

＜ユースケース1＞遠隔監視：自動運転システムの常時通信接続確保：通信の安定性確保	
1. 遠隔監視(映像)	
1-1. 映像品質	
設問1	遠隔監視画面の映像の解像度(画質)は十分でしたか。
設問2	遠隔監視画面の映像の明るさやコントラストは適切でしたか
設問3	遠隔監視画面の映像の途切れやノイズは発生していましたか
設問4	遠隔監視画面は必要な範囲を十分にカバーしていましたか(視野角に問題はありませんでしたか)
設問5	遠隔監視画面は悪天候時や強い日差しがさす環境などでも視認性が保たれていましたか
設問6	遠隔監視画面の全体的な映像品質に満足していますか
2. AI 白杖検知	
2-1. 車両制御	
設問7	バスの自動運転化が今後進む中で、バスの運転以外の業務で自動化を進める必要があると考える業務を教えてください
設問8	ダッシュボードに表示されている内容は分かりやすかったですか
＜ユースケース4＞安定活円滑な周辺環境情報の伝送：周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装	
3. 都市 OS 連携(災害)	
3-1. システム操作性	
設問9	ダッシュボードに表示されている内容は分かりやすかったですか
設問10	遠隔監視室から車両制御に係る情報を車両側に提供するにあたり、遠隔監視画面に表示されている情報に過不足はありましたか
設問11	表示項目の配置や画面構成は見えやすく、操作しやすかったですか
設問12	音声は明瞭に聞き取れましたか
設問13	システム操作中に混乱や誤操作の恐れはありませんでしたか
設問14	全体として、遠隔監視装置の操作性・使いやすさに問題はありませんでしたか
3-2. 車両制御の妥当性	
設問15	災害情報の受信タイミングは適切でしたか

設問16	災害情報を受信した後、走行ルートの切り替えを問題なく実施できていましたか
設問17	走行ルート切り替え時の車両挙動に違和感はありませんでしたか
設問18	走行ルート切り替え時に混乱や誤操作の恐れはありませんでしたか
設問19	全体として、車両制御の妥当性は確保されていましたか
3-3. 乗客の安全性	
設問20	走行ルートの切り替えの際、車両の減速・停止など安全な挙動が確保されていましたか
設問21	走行ルート切り替えの際、乗客への案内は十分でしたか
設問22	想定外の挙動や、不安を感じる場面はありませんでしたか
設問23	緊急時に手動介入や停止が確実にできる体制は確保されていましたか
設問24	目的地(仙台うみの杜水族館)到着時、安全に停車したうえで、問題なく避難誘導できていましたか
設問25	総合的に見て、ルート切り替え時に乗客の安全性が確保されていたと感じましたか
3-4. 運用負担の軽減効果	
設問26	都市 OS から受信した災害情報をもとに車両制御を行うことで、運転業務の負担は軽減されていましたか(または減少すると思いますか)
設問27	災害情報が都市 OS から自動で遠隔監視画面に反映されることで、運行中に余裕が生まれていましたか(または生まれると思いますか)
4. 都市 OS 連携(工事)	
4-1. 通過時の安全性	
設問28	工事情報の受信タイミングは適切でしたか
設問29	工事情報の受信内容は明確でしたか
設問30	車線変更の開始タイミングは適切でしたか
設問31	車両の動き(加減速・ハンドル操作等)は安定していましたか
設問32	車線変更時、周囲の車両や歩行者との距離は十分に確保されていましたか
設問33	工事区間通過後、元の車線への復帰タイミングと動作は適切でしたか
設問34	工事区間の回避動作全体を通じて、車両の挙動に不自然さや危険を感じる場面はありませんでしたか
設問35	工事区間の回避動作を総合的に見て、通過安全性は確保されていると感じられましたか
4-2. システム操作性	
設問36	遠隔監視画面のダッシュボードに表示されている工事情報連携の内容は分かりやすいものでしたか
設問37	遠隔監視画面から車両制御に係る情報を車両側に提供するにあたり、遠隔監視画面に表示されている内容に過不足はありませんでしたか
設問38	自動運転バスからの音声は明瞭に聞き取ることができましたか
設問39	遠隔監視画面に表示されている工事情報について、表示項目の配置や画面構成は見やすく操作しやすいと感じられましたか
設問40	遠隔監視装置システムを操作する際、操作方法について混乱や誤動作の恐れはありましたか

設問41	工事情報の連携作業全体を通じて、遠隔監視装置の操作性や使いやすさに問題はありましたか
4-3. 車両制御の妥当性	
設問42	車両制御を行うにあたり、工事情報の受信タイミングは適切でしたか
設問43	工事情報を受信した後、車線変更を問題なく実施できていましたか
設問44	車線変更時、車両の挙動に違和感はありませんでしたか
設問45	車線変更時の車両制御について、混乱や誤動作の恐れはありませんでしたか
設問46	全体を通して、車両制御の妥当性は確保されていましたが
4-4. 乗客の安全性	
設問47	工事区間の回避における車線変更の際、車両の減速や停止等で安全な挙動が確保されていましたが
設問48	車線変更時の乗客への案内は十分に実施できていましたか
設問49	想定外の挙動や乗客が不安を感じる場面はありませんでしたか
設問50	緊急時に手動介入や停止が確実に行える体制は確保されていましたが
設問51	総合的に見て、車線変更時の乗客の安全が確保されていたと感じられましたか
4-5. 運用負担の軽減効果	
設問52	都市 OS から受信した工事情報をもとに車両制御を行うことで、運転業務の負担は減少した、または減少すると感じられましたか
設問53	工事情報が都市 OS から自動で遠隔監視画面に反映されることで、運行中に余裕が生まれた、または生まれると感じられましたか

8.1.2 一般試乗者を対象としたアンケート

表 48 東部北ルートにおける一般試乗者を対象としたアンケート設問

基本属性・参加状況	
設問1	あなたの性別を教えてください
設問2	あなたの年齢を教えてください
設問3	どちらにお住まいですか
設問4	本実証実験の関係者かどうか教えてください
設問5	あなたと自動運転の関わりについて、最も近い内容を選択してください
設問6	自動運転バスにご乗車いただいた日、もしくは遠隔監視室を見学した日はいつですか
設問7	ご乗車いただいたバスの時間、もしくは遠隔監視室を見学した時間について教えてください
設問8	本日の試乗会ご参加の目的を教えてください
自動運転バス全体の安心感・安全性	
設問9	自動運転バスに対して、不安はありましたか。乗車前後それぞれ教えてください
設問10	自動運転バスの運行を支えるシステムは、乗車に対するあなたの安心感につながりますか。それぞれの仕組みについてお答えください
設問11	今回の試乗会を通じて、自動運転バスを日常的に乗車したいと思いましたか

設問12	時間の正確さ・運行の確実性に満足できたか、教えてください
設問13	プライバシー(カメラ等)への抵抗感はなかったか、教えてください
設問14	今回の試乗会を通じて、自動運転バスがあなたの街で走行しても良いと思いましたか
設問15	遠隔監視室の見学の際に特に印象に残った技術や説明は何ですか
設問16	設問15で選んだ項目について、選んだ理由を教えてください
設問17	ご自身が体験したものについてお選びください
工事区間回避の走行シナリオ	
設問18	車線変更時のバスの動き(加速・減速・カーブなど)の安定性について、教えてください
設問19	車線変更時、急な揺れや不安を感じるような動きがなかったか、教えてください
設問20	車線変更時、案内(音声・表示など)は分かりやすかったか、教えてください
設問21	工事情報を受けた際の対応(停車・経路変更など)は適切だったか、教えてください
設問22	バス内の案内表示から状況が理解できたか、教えてください
設問23	乗車を体験し、全体として車線変更時の安全性は満足のいくものだったか、教えてください
災害・緊急時対応の走行シナリオ	
設問24	走行ルート変更時のバスの動き(加速・減速・カーブなど)は安定していましたか
設問25	ルート変更時、急な揺れや不安を感じるような動きはなかったですか
設問26	走行ルートが変更された際、案内(音声・表示など)は分かりやすかったか、教えてください
設問27	走行ルート変更後も、安全に走行していると感じられたか、教えてください
設問28	災害情報を受けた対応(停車、経路変更等)は適切だと思いましたか
設問29	バス内の案内表示から状況が理解できたか、教えてください
設問30	緊急時でも安心して乗車していただくと感じたか、教えてください
設問31	乗車を体験し、全体としてルート変更時の安全性に問題はなかったか教えてください

8.2 秋保ルートにおけるアンケート設問

8.2.1 遠隔監視員を対象としたアンケート

表 49 秋保ルートにおける遠隔監視員を対象としたアンケート設問

<ユースケース1> 遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保	
1. 遠隔監視 映像品質	
設問1	L5Gエリアおよびキャリアネットワーク重畳エリアにおいて、車両からの映像を常時安定して監視できていましたか
設問2	遠隔監視に必要な映像品質は確保できていましたか
設問3	車両状態の把握や遠隔操作において、通信遅延は許容範囲内でしたか
設問4	遠隔監視者の立場から見て、リスクが高いと感じた点や課題はありましたか
2. 車両制御	
設問5	路面状況判断システムは、実際の路面凍結状況を適切に認識していましたか

設問6	凍結の有無や程度の判定結果は、運転判断に活用できる内容でしたか
設問7	路面状況に応じたアシスト内容(減速)は妥当でしたか
<ユースケース2> 遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保	
3. 遠隔監視_映像品質	
設問8	遠隔監視画面の映像の解像度(画質)は十分でしたか
設問9	遠隔監視画面の映像の明るさやコントラストは適切でしたか
設問10	遠隔監視画面の映像の途切れやノイズは発生していませんでしたか
設問11	遠隔監視画面は、必要な範囲を十分にカバーしていましたか(視野角に問題はなかったですか)
設問12	遠隔監視画面は、悪天候時や強い日差しが差す環境などでも視認性が保たれていましたか
設問13	遠隔監視画面の全体的な映像品質に満足していますか
4. 車両制御	
設問14	車両の動作は安定していましたか(急ブレーキ・急発進・急カーブ等はないか)
設問15	緊急停止・手動介入が必要となった場合、問題なく行えましたか(タイミング等)
設問16	全体として車両制御に関する改善点はありましたか
5. AI 白杖検知_車両制御	
設問17	バスの自動運転化が今後進む中でバスの運転以外の業務で自動化を進める必要があると考える業務を教えてください
設問18	ダッシュボードに表示されている内容は分かりやすかったですか
<ユースケース4> 安定活円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装	
6. システム操作性、UI	
設問19	ダッシュボードに表示されている内容は分かりやすかったですか
設問20	遠隔監視室から車両制御に係る情報を車両側に提供するにあたり、遠隔監視画面に表示されている情報に過不足はありませんでしたか
設問21	表示項目の配置や画面構成は見やすく、操作しやすかったですか
設問22	音声は明瞭に聞き取れましたか
設問23	システム操作中に混乱や誤操作の恐れはなかったですか
設問24	都市 OS から受信した道路状態(凍結情報)、運転モードは確実に表示されていましたか
設問25	バスの映像伝送と路面凍結情報の表示・連携タイミングにずれはなかったですか
設問26	全体として、遠隔監視装置の操作性・使いやすさに問題はなかったですか
7. 車両制御の妥当性	
設問27	走行モード切り替えに係る情報の受信(表示)タイミングは適切でしたか
設問28	走行モードの切り替えは問題なく実施できましたか
設問29	走行モード切り替え時に車両挙動に違和感はなかったですか
設問30	走行モード切り替え時に混乱や誤操作の恐れはなかったですか
設問31	全体として、車両制御の妥当性は確保されていましたか

8. 運用負担の軽減効果	
設問32	都市 OS から受信した凍結情報をもとに車両制御を行うことで、運転業務の負担は減少しましたか(減少すると思いますか)

8.2.2 一般試乗者を対象としたアンケート

表 50 秋保ルートにおける一般試乗者を対象としたアンケート設問

基本属性・参加状況	
設問1	あなたの性別を教えてください
設問2	あなたの年齢を教えてください
設問3	どちらにお住まいですか
設問4	自動運転バスにご乗車いただいた日、もしくは遠隔監視室を見学した日はいつですか
設問5	ご乗車いただいたバスの時間、もしくは遠隔監視室を見学した時間について教えてください
設問6	本実証実験の関係者かどうか教えてください
設問7	本日の試乗会ご参加の目的を教えてください
設問8	あなたと自動運転の関わりについて、最も近い内容を選択してください
設問9	今までに自動運転バスに乗車された回数について教えてください
自動運転バス全体の安心感・安全性	
設問10	自動運転バスに対して、不安はありましたか。乗車前後それぞれ教えてください
設問11	自動運転バスの運行を支えるシステムは、乗車に対するあなたの安心感につながりますか。それぞれの仕組みについてお答えください
設問12	今回の試乗会を通じて、自動運転バスを日常的に乗車したいと思いましたが
設問13	時間の正確さ・運行の確実性に満足できたか、教えてください
設問14	プライバシー(カメラ等)への抵抗感はなかったか、教えてください
設問15	今回の試乗会を通じて、自動運転バスがあなたの街で走行しても良いと思いましたが
設問16	遠隔監視室の見学の際に特に印象に残った技術や説明は何ですか
設問17	設問16で選んだ項目について、選んだ理由を教えてください
設問18	自動運転バスへの乗車に対するあなたの安心感を高めるために、本日見学・ご紹介したシステム以外にあれば良いと思う技術やサービスがございましたらご自由にご記入ください
凍結路面の走行シナリオ	
設問19	走行時(凍結路面含む)のバスの動き(加速・減速・カーブなど)は安定していましたか
設問20	走行中(凍結路面含む)、安全に走行していると感じられましたか
設問21	案内(音声・表示など)は分かりやすかったですか
設問22	バス内の案内表示から状況は理解できましたか
設問23	凍結路面走行時のモード切替は適切だと感じられましたか
設問24	全体として、走行時(凍結路面含む)の安全性は満足いくものでしたか

地域社会 DX 推進パッケージ事業(自動運転レベル4検証タイプ)
安全な自動運転に資する通信システム等の検証に関する調査研究(実証地域:宮城県仙台市)
実績報告書
通信の安定性確保と都市 OS 連携による環境情報を用いた自動運転走行の実証

2026年2月

仙台市における自動運転の社会実証機関
